

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PH Y TEMPERATURA
PARA UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE LECHO FIJO**

CLAUDIA MARCELA VELANDIA ARDILA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PH Y TEMPERATURA
PARA UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE LECHO FIJO**

CLAUDIA MARCELA VELANDIA ARDILA

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director:

**OMAR A. GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

Codirector:

**LIGIA PATRICIA ARENAS
Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010**

Dedicatoria

*A Dios, por guiarme en cada etapa de mi vida
y permitirme llevarla a buen término.*

*A mi madre, María del Socorro,
porque sin su apoyo y amor incondicional
nada de esto hubiera sido posible.*

*A mi padre, a mis hermanos y a mis amigos
que con su compañía, motivación y alegría
hoy son merecedores de este triunfo.*

Claudia Marcela

AGRADECIMIENTOS

A **Omar Armando Gelvez Arocha, Ingeniero Mecánico**, director del proyecto por sus aportes, orientación y colaboración.

A **Pedro E. Caldas, Técnico de Mantenimiento**, por su colaboración, dedicación y valiosos aportes.

A **Ligia Patricia Arenas, Ingeniera Química**, codirectora del proyecto por su confianza y colaboración.

A **Harvey Rojas, Ingeniero Químico**, por sus asesorías y amistad.

A las personas que hacen parte del **CEIAM** y al grupo de **técnicos pertenecientes a la escuela de Ingeniería Química** por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS.....	18
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA	19
2.2. EFECTO DEL PH Y LA TEMPERATURA SOBRE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	20
2.3. ESTRATEGIAS DE CONTROL	20
2.3.1. Control ON-OFF.....	20
2.3.2. Control Continuo.. ..	22
2.3.2.1. Control Continuo Con PID.....	22
2.4. ADQUISICIÓN ANALÓGICA DE DATOS “DAQ”	24
3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	25
3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	26
3.1.1. Descripción del Sistema de Control de pH.....	26
3.1.2. Descripción del Sistema de Control de Temperatura.....	26
3.2. ACCIONES DESARROLLADAS PARA REGULAR LA TEMPERATURA.....	28

3.2.1.	Implementación de una Subrutina PWM.....	26
3.2.2.	Sustitución del Relé por un Variador de Potencia de Estado Sólido.....	26
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	30
4.1.	PROGRAMA DE MONITOREO Y CONTROL.....	30
4.1.1.	Pestaña Página Principal.....	35
4.1.2.	Pestaña Temperatura y pH.....	35
4.1.3.	Pestaña CONTROL ON-OFF de Temperatura.....	35
4.1.3.	Pestaña CONTROL ON-OFF de pH.....	35
4.1.3.	Pestaña CONTROL PID de Temperatura.....	35
4.2.	SINTONIZACIÓN DEL CONTROL PID.....	36
4.3.	RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE LOS MÉTODOS DE CONTROL.....	38
4.4.	RESPUESTA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	41
5.	CONCLUSIONES.....	43
6.	RECOMENDACIONES.....	44
7.	BIBLIOGRAFIA.....	45
	ANEXOS.....	45

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Degradación y reciclaje de la materia orgánica en sedimentos en relación con la reducción bacteriana de la metanogénesis.....	19
FIGURA 2. Control de dos posiciones on-off	21
FIGURA 3. Sistemas de control de temperatura y pH	27
FIGURA 4. Comparación del control de temperatura utilizando el relé sin y con la rutina PWM y el variador de potencia	28
FIGURA 5. Entrada de corriente Vs. Salida de voltaje con el relé de estado sólido	29
FIGURA 6. Entrada de corriente Vs. Salida de voltaje con el variador de potencia de estado sólido.....	29
FIGURA 7. Pestaña Página Principal	30
FIGURA 8. Diagrama de Bloques de la Pestaña Página Principal	31
FIGURA 9. Pestaña de temperatura y pH.....	32
FIGURA 10. Diagrama de Bloques de la Pestaña de temperatura y pH.....	32
FIGURA 11. Pestaña control on-off de temperatura	33
FIGURA 12. Diagrama de Bloques de la Pestaña control on-off de temperatura ..	33
FIGURA 13. Pestaña control on-off de pH.....	34
FIGURA 14. Diagrama de Bloques de la Pestaña control on-off de pH.....	34
FIGURA 15. Pestaña control PID de temperatura	35
FIGURA 16. Diagrama de Bloques de la Pestaña control PID de temperatura	36
FIGURA 17. Curva en forma de S obtenida.....	37
FIGURA 18. Respuesta del CONTROL ON-OFF para el pH.....	38

FIGURA 19. Respuesta del CONTROL ON-OFF para la temperatura	39
FIGURA 20. Respuesta del CONTROL PID con PWM para la temperatura	40
FIGURA 21. Respuesta del CONTROL PID con el variador de potencia para la temperatura.....	40
FIGURA 22. Comparación de los volúmenes de biogás obtenido por los diferentes métodos de control	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los sistemas de control ON-OFF y PID	23
Tabla 2: Regla de Sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de planta.....	36
Tabla 3: Parámetros de sintonización para el controlador PID	38
Tabla 4: Comparación de los porcentajes de eficiencia para los diferentes tipos de control	41

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Descripción y manejo de la interfaz	48
ANEXO B. Diagrama de bloques del programa	53
ANEXO C. Caracterización fisico-química del alimento del reactor.	58
ANEXO D. Descripción general del sistema metanogénico.....	59
ANEXO E. Equipos que conforman el sistema metanogénico.....	61
ANEXO F. Descripción del medidor de biogás	63
ANEXO G. Sistema modular Field Point.....	64
ANEXO H. Especificaciones del variador de potencia	66
ANEXO I. Perfiles de temperatura y pH.....	67
ANEXO J. Registro de pH, temperatura y volumen de biogás.....	68

GLOSARIO

BIODIGESTOR: reactor en el cual se lleva a cabo el proceso de degradación biológica de la materia orgánica residual.

BIOGÁS: mezcla gaseosa formada, principalmente por metano, dióxido de carbono y pequeñas proporciones de otros gases como sulfuro de hidrogeno, hidrogeno, amoniaco, etc.

LABVIEW: lenguaje de programación gráfica utilizado para realizar la interfaz de monitoreo y control del presente trabajo.

METANOGENÉISIS: proceso biológico en el cual se produce metano por acción de bacterias anaerobias pertenecientes principalmente al grupo de las Archeobacterias.

PWM: (Pulse-Width Modulation) Modulación por ancho de pulsos de una señal o fuente de energía. Es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

RESUMEN

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PH Y TEMPERATURA PARA UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE LECHO FIJO.*

AUTOR: Claudia Marcela Velandia Ardila.**

PALABRAS CLAVES: control continuo, control ON-OFF, metanogénesis, biogás, labview.

DESCRIPCIÓN:

Como contribución a la iniciativa del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) de ofrecer soluciones para el tratamiento de residuos urbanos sólidos se buscó optimizar la producción de gas de un sistema metanogénico de lecho fijo a escala piloto implementando una interfaz gráfica que permite monitorear, almacenar y controlar el pH y la temperatura que son las variables más relevantes de este proceso.

La interfaz implementada permite seleccionar para el control de temperatura entre dos tipos de control de uso común los cuales son ON-OFF y PID, manteniendo automáticamente la temperatura en un rango favorable para el crecimiento de los organismos productores de biogás el cual se encuentra entre 30 y 40 °C.

Debido a la producción de ácidos grasos volátiles, el sistema tiende hacia la acidificación por tanto se hace necesario mantener el pH en un rango de 7 a 8,5. Esto se consigue encendiendo o apagando una bomba de diafragma encargada de suministrar al sistema bicarbonato de sodio utilizando el control on-off.

Se comprobó que la producción de Biogás mejora sustancialmente al contar con un método de control. El control PID con controlador de potencia es 29,28% más eficiente que el control ON-OFF y 8,95% más eficiente que el control PID con PWM y a la vez resulta 66,18% más eficiente controlar el sistema metanogénico con la estrategia PID que tiene el variador de potencia que dejarlo sin método de control alguno.

* Proyecto de grado.

**Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Ing. Mecánico Omar A. Gévez Arocha, Codirector: Ing. Química Ligia Patricia Arenas

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF A CONTROL SYSTEM OF pH AND TEMPERATURE BY A FIXED BED ANAEROBIC BIODIGESTOR.*

AUTHOR: Claudia Marcela Velandia Ardila. ♣ ♣

KEYWORDS: continuous control, ON-OFF control, methanogenesis, biogas labview

DESCRIPTION:

As a contribution to the Centre for Studies and Research in the Environment (CEIAM) to provide solutions for the treatment of solid urban waste sought to optimize the gas production of a fixed-bed methanogenic pilot-scale implementing a graphical interface to monitor, store and control the pH and temperature are the most important variables in this process.

The interface implemented to select for temperature control between two control types which are commonly used ON-OFF and PID, automatically maintaining the temperature at a favorable range for growth of organisms producing biogas which is between 30 and 40 ° C.

Due to the volatile fatty acid production, the system tends to acidification is therefore necessary to maintain the pH in the range of 7 to 8.5. This is accomplished by turning on or off a diaphragm pump responsible for supplying the sodium bicarbonate system using the on-off control.

It was found that biogas production substantially improved by having a method of control. PID control power controller is 29.28% more efficient than the ON-OFF control and 8.95% more efficient than the PID control with PWM at the same time is 66.18% more efficient control system with the strategy methanogenic PID that has the power to let him drive without a method of control.

* Degree work.

**Industrial University of Santander, Faculty of Physicochemical Engineerings, School of Chemical Engineering. Director: Ing. Mecánico Omar A. Gélviz Arocha, Codirector: Ing. Química Ligia Patricia Arenas

INTRODUCCIÓN

La etapa metanogénica de la digestión anaerobia puede ser fácilmente inestable debido a que las bacterias metanogénicas son altamente sensibles a las fluctuaciones de temperatura, pH y carga por eso esta etapa del proceso es conocida por necesitar sofisticados sistemas de control.¹

Puesto que el pH y la temperatura son las variables que comúnmente se monitorean en línea, la implementación de un esquema de monitoreo permanente para la temperatura y el pH provee información útil para el análisis posterior del comportamiento de estas variables en el sistema.²

Este trabajo surge de la necesidad de reacondicionar un biodigestor anaerobio de lecho fijo para operación en continuo a escala piloto con control de temperatura y pH³ que se encuentra actualmente en el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales “CEIAM” y de disponer de un sistema de control eficiente para que en conjunto tenga un desempeño adecuado del mismo.

Cabe aclarar que el sistema metanogénico se construyó como parte del proyecto “ESTUDIO DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y DE LAS BIOPELÍCULAS ANAEROBIAS COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO CONTINUO EN DOS FASES DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS” aprobado en la Convocatoria Nacional de Proyectos de Investigación – Año 2004. Programa Nacional de Biotecnología.

¹ GHOSH S. Memorias del II Simposio Internacional de Digestión Anaerobia de Residuos Solidos. Vol 1. Barcelona 1999.

² Filho R. y De Assis A. Computers and Chemical Engineering. Vol. 24. 2000.

³ MARTÍNEZ R., Guillermo A y RODRÍGUEZ W., Carolina. Diseño y Construcción de un Biodigestor Anaerobio de Lecho Fijo Para Operación en continuo a Escala Piloto con Control de Temperatura y pH. Bucaramanga 2007. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química

Al establecer un sistema de control se pretende optimizar el funcionamiento del sistema metanogénico y a la vez evitar que el operario tenga que sacar muestras del contenido del reactor periódicamente para registrar el pH y la temperatura. La interfaz implementada provee estos datos en tiempo real con precisión garantizada por la instrumentación utilizada y además crea registros de estas variables en un archivo Excel para su posterior análisis.

El presente documento describe el desarrollo del trabajo. En el primer capítulo se exponen los objetivos que motivaron el desarrollo del trabajo.

En el segundo capítulo se presentan los fundamentos teóricos acerca de la digestión anaerobia, los efectos del pH y la temperatura sobre el proceso, las estrategias de control on-off y continuo junto con sus ventajas y desventajas y finalmente una descripción de la adquisición analógica de datos.

En el tercer capítulo se describe la metodología seguida para desarrollar el proyecto y el programa de monitoreo y control realizado.

En el cuarto capítulo se describen y analizan las respuestas del sistema a los dos tipos de control implementados. Finalmente se hace una comparación y análisis de los volúmenes obtenidos de biogás sin usar control alguno y utilizando control on-off y control continuo.

1.OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Contribuir a la iniciativa del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales “CEIAM” de ofrecer soluciones para el tratamiento de efluentes industriales y residuos urbanos sólidos como parte del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIR).

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar los ajustes necesarios a un biodigestor anaerobio existente en el CEIAM para optimizar el funcionamiento del mismo.

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo y control virtual de las variables relevantes en el proceso de digestión anaerobia las cuales son pH y temperatura.

Desarrollar una interfaz gráfica para monitoreo, almacenamiento y control de pH y temperatura.

Sintonizar las variables para integrar los controladores al proceso.

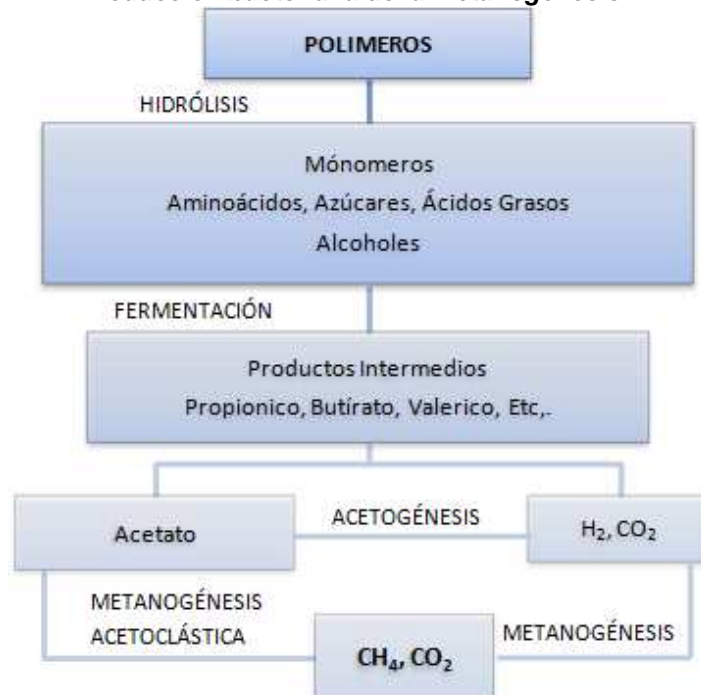
2.MARCO TEÓRICO

2.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo en el cual, parte de la materia orgánica contenida en el sustrato es convertida por la acción de los microorganismos en una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono y un efluente estabilizado formado por la mezcla de biomasa y del producto resultante de la degradación anaerobia.

La Figura 1 muestra el proceso de digestión anaerobia en el cual la metanogénesis es la etapa durante la cual se produce metano a partir de ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono.

Figura 1: Degradación y reciclaje de la materia orgánica en sedimentos en relación con la reducción bacteriana de la metanogénesis.



FUENTE: KRUMBEIN, W. Microbial Geochemistry. Blackwell Publications. 1983.

2.2. EFECTO DEL PH Y LA TEMPERATURA SOBRE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La temperatura afecta directamente el nivel de degradación e influye en la actividad metabólica de los microorganismos que en ella intervienen.

La eficiencia de los procesos anaerobios es altamente dependiente de la temperatura de los reactores donde se lleva a cabo y en el caso de los reactores metanogénicos, estos se deben regular a una temperatura de 38°C.

En cuanto al pH cabe aclarar que las bacterias metanogénicas se desarrollan mejor bajo condiciones neutras, (pH de 7.0 a 8.5). En un reactor metanogénico la acumulación de ácidos grasos volátiles, causan una caída del pH (acidificación) esto puede provocar inestabilidad, ya que un pH inferior a 6.2 se convierte en un factor tóxico para esta clase de bacterias.⁴

2.3. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Los procesos son de naturaleza dinámica, en ellos siempre ocurren cambios y si no se emprenden las acciones pertinentes, las variables importantes del proceso, no cumplirán con las condiciones de diseño⁵

En esta sección se presentan dos estrategias de control consideradas como convenientes para implementar en el reactor metanogénico.

2.3.1. Control ON-OFF. El control ON-OFF es un control de dos posiciones y también es la forma más simple de control por realimentación (ver figura 2). En este caso el elemento final de control solo ocupa una de las dos posiciones posibles.

⁴ STAINER, Roger., INGRAHAM, John., WHEELIS, Mark., PAINTER, Page. Microbiología. Ed Reverté S.A. Barcelona. 1989.

⁵ SMITH, Carlos A. y CORRIPIO, Armando B. Control Automático de Procesos. Cuarta Edición. Editorial Limusa, México. 1997.

Matemáticamente se puede describir de la siguiente manera.

$$u(t) = \begin{cases} u_{max} & \text{si } e > 0 \\ u_{min} & \text{si } e < 0 \end{cases}$$

Dónde e es la diferencia entre la señal de entrada de la variable a controlar y la señal de salida del proceso.

Figura 2: Control de dos posiciones ON-OFF



FUENTE: Autor

Este tipo de control es relativamente simple y barato, lo cual hace que su uso sea común y frecuente en sistemas de control tanto industriales como domésticos donde el elemento final de control no requiera una alta precisión.

2.3.2. Control Continuo. El control continuo consiste en un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia comparándolas y usando la diferencia como medio de control. También es denominado sistema de control realimentado⁶.

Un lazo de control está compuesto por tres elementos principales, encargados de medir, comparar y ajustar, los cuales son:

- Sensor: Elemento de medición de las variables de interés del proceso.
- Controlador: Compara el valor medido con el valor deseado y toma la acción pertinente para mantener la variable de interés en el rango deseado.
- Actuador: Regula la variable de control.

2.3.2.1. Control Continuo con PID. Este tipo de control reúne tres acciones: proporcional (P), Integral (I) y derivativa (D), su propósito es hacer que la diferencia entre la señal de entrada de referencia y la señal de salida tienda a cero. Esto se logra mediante el uso de la acción integral.

Matemáticamente la combinación de los tres controles mencionados es:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$u(t)$: Salida del controlador

$e(t)$: Señal de error.

K_p : Ganancia proporcional

⁶ OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Tercera Edición. Ed. Prentice Hall. México. 1998.

T_i : Tiempo Integral

T_d : Tiempo derivativo

Cada tipo de control tiene las siguientes características:

- Control Proporcional: Estabiliza la oscilación natural de la variable controlada y elimina el grado de inestabilidad que introduce los controles integral y derivativo.
- Control Integral: Reajusta las variaciones de la señal de entrada para disminuir el error en estado estable
- Control Derivativo: Introduce un efecto estabilizador en la respuesta con lazo cerrado al anticiparse a futuros errores.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los sistemas de control ON-OFF y PID

TIPO DE CONTROL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ON-OFF	Controlador económico Sistema confiable Fácil de instalar y de ajustar	La oscilación es continua Pueden haber grandes desviaciones respecto al valor de referencia
PID	Mejora la velocidad de respuesta sin producir problemas de estabilidad Disminuye el error en estado estable.	Presenta problemas cuando su derivada es cero y cuando las señales presentan perturbaciones El proceso de sintonización puede resultar tedioso.

FUENTE: Autor

2.4. ADQUISICIÓN ANALÓGICA DE DATOS “DAQ”

La acción de medir las variables de un proceso físico y convertirlas a formato digital se conoce como adquisición de datos. Para eso es necesario:

- Contar con un sensor/transmisor adecuado para medir la variable. Su función será detectar y convertir la variable física en una señal analógica de corriente eléctrica o voltaje.
- Acondicionar la señal eléctrica. Se resuelven problemas como ruido y amplitud.
- Conversión Analógica Digital A/D. Consiste en la traducción de la señal eléctrica al lenguaje binario que es el lenguaje del computador.
- Almacenamiento de datos en forma digital.

Para los sistemas DAQ (Data Acquisition System) es necesario un software que controle y administre los recursos del computador, presente los datos y permita análisis rápido de los mismos, actualmente existen muchos programas que cumplen a estas exigencias como lo son C++, Pascal, LabWindows y Labview.⁷

⁷ DAVIS, Enrique. Tutorial Básico para utilizar Measurement & Automation de National Instruments con Labview 5,1. Mérida 2000.

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Partiendo de la importancia de mantener las variables de temperatura y pH dentro de un rango favorable para el metabolismo de los microorganismos encargados de la biodigestión, se planteó una estrategia para optimizar el funcionamiento del sistema metanogénico consistente en las fases que se describen a continuación:

FASE 1: Se hizo la revisión bibliográfica acerca de la digestión anaerobia, el funcionamiento del sistema metanogénico, adquisición de datos y programación gráfica. También se planteó el cronograma para desarrollar el trabajo.

FASE 2: Durante esta fase se probó el funcionamiento del sistema metanogénico para lo cual fue necesario verificar el funcionamiento de cada uno de sus componentes al igual que la producción de biogás.

FASE 3: Se identificaron los sistemas de control que se describen en detalle en la sección 3.1, también se calibró el sensor de pH utilizando soluciones buffer de pH 4, 7 y 10.

FASE 4: Se seleccionó el software Labview 2009 para realizar el programa de control debido a la compatibilidad que presenta con el sistema modular Field Point, se configuraron también las termocuplas tipo J para operar en el rango de 0 a 100°C utilizando la herramienta de Measurement and Automation de Labview.

FASE 5: Se diseñó e implementó la Interfaz de control para las variables del proceso y finalmente se comparó el volumen obtenido de Biogás con los tipos de control implementados y el obtenido sin el uso de control alguno.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Para evitar alteraciones en la actividad microbiana es necesario mantener controladas las variables que más influyen sobre la misma las cuales son pH y temperatura, de esta manera aumenta la eficacia de degradación anaerobia del sistema.⁸

El sistema de control de temperatura y pH se muestra en la figura 4 y se describe a continuación:

3.1.1. Descripción del Sistema de Control de pH.

El sistema de control de pH está conformado por:

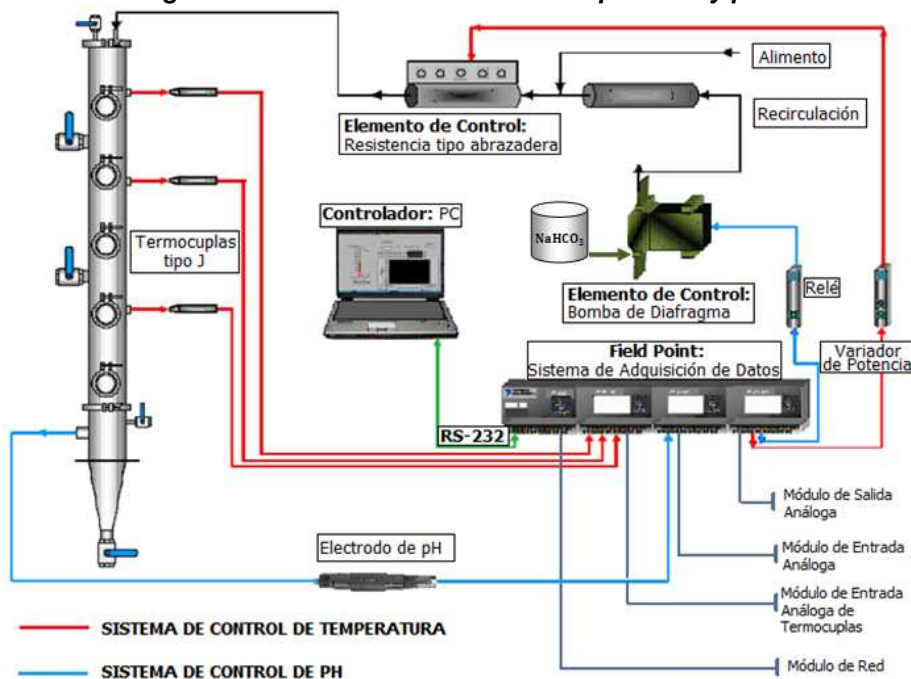
Sensor: Un electrodo de pH que se encarga de enviar la señal al módulo de entrada FP-AI-110 donde es filtrada y convertida a digital por un convertidor análogo digital (ADC) de 16 bits de resolución.

Controlador: El computador recibe la señal gracias al módulo FP-1000 a través del puerto serial RS-232 y la interfaz gráfica diseñada compara el valor medido con el setpoint, evalúa el error y toma la decisión correspondiente. La señal que sale de aquí se envía al módulo de red FP-AO-200 donde es convertida a análoga por un convertidor digital análogo (DAC) de 12 bits de resolución.

Actuador: La bomba de diafragma dosifica una solución de bicarbonato de sodio para regular el pH cuando la señal que sale del módulo FP-AO-200 llega al relé de estado sólido que se encarga de encenderla o apagarla.

⁸ RITTMANN, Bruce E. y MacCARTY, Perry L. Biotecnología del Medio Ambiente, Principios y Aplicaciones. Ed. McGraw-Hill. España 2001.

Figura 3: Sistemas de Control de temperatura y pH



Fuente: Autor

3.1.2. Descripción del Sistema de Control de Temperatura.

El sistema de control de temperatura está conformado por:

Sensor: Tres termocuplas tipo J ubicadas a lo largo de la columna que miden la temperatura y envían la señal al módulo FP-TC-120 donde es filtrada y convertida a digital por un convertidor análogo digital (ADC) de 16 bits de resolución.

Controlador: El computador recibe la señal gracias al módulo FP-1000 y la acción realizada es la misma descrita para el caso del pH.

Actuador: Una resistencia de calentamiento es la encargada de calentar el flujo que ingresa al biodigestor para que la temperatura dentro del mismo sea apropiada.

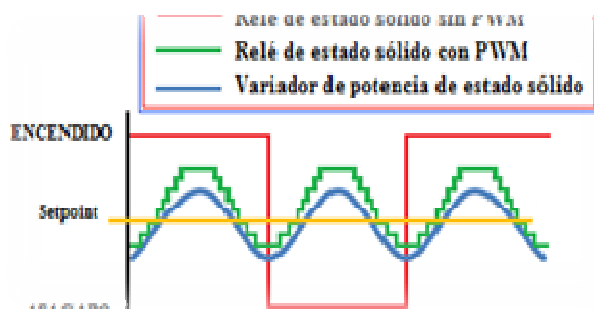
3.2. ACCIONES DESARROLLADAS PARA REGULAR LA TEMPERATURA

Como el modulo FP-AO-200 entrega una corriente de 4 a 20 mA, y la respuesta del relé de estado sólido será únicamente 0 ó 120 voltios, se probaron dos métodos para regular la potencia entregada a la resistencia (ver figura 5)

3.2.2. Implementación de una Subrutina PWM

Con la rutina PWM (modulación por ancho de pulsos), se buscó obtener una respuesta satisfactoria al control PID sin tener que modificar el hardware del sistema. Al apagar y prender la señal de alimentación al relé de estado sólido, se obtiene un “switcheo constante” que simula la variación de potencia suministrada a la resistencia de calentamiento cuyo voltaje de alimentación se moverá de forma pulsante; para esto, se deja el pulso fijo en el tiempo y se varia su amplitud, es decir, cuando el relé es alimentado por una corriente de 4 a 20 mA se tendrá una salida de 0 a 120 voltios regulada por el PWM. (Ver figura 6).

Figura 4: Comparación del control de temperatura utilizando el relé sin y con la rutina PWM y el variador de potencia

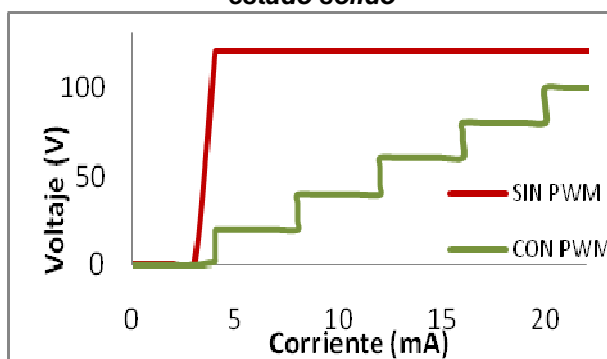


Fuente: autor

3.2.2. Sustitución del Relé por un Variador de Potencia de Estado Sólido:

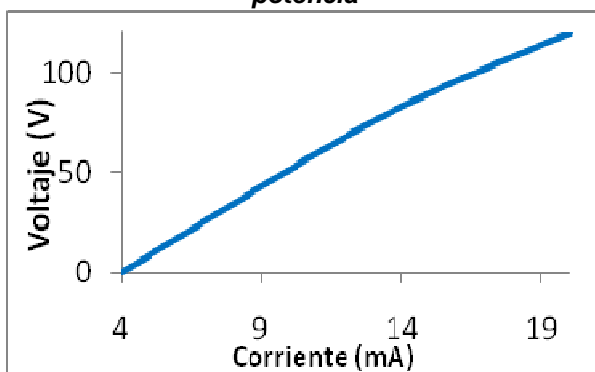
En busca de una mejor respuesta al sistema de control PID se adquirió un variador de potencia de alta precisión OPI48P25G con el fin de ajustar la potencia en un rango lineal de 0 a 100% del voltaje aplicado a la resistencia de calentamiento, posibilitando un ajuste perfecto de la temperatura deseada (ver figura 7).

Figura 5: Entrada de corriente Vs salida de voltaje con el relé de estado sólido



FUENTE: Autor

Figura 6: Entrada de corriente Vs salida de voltaje con el variador de potencia



FUENTE: Autor

4.RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

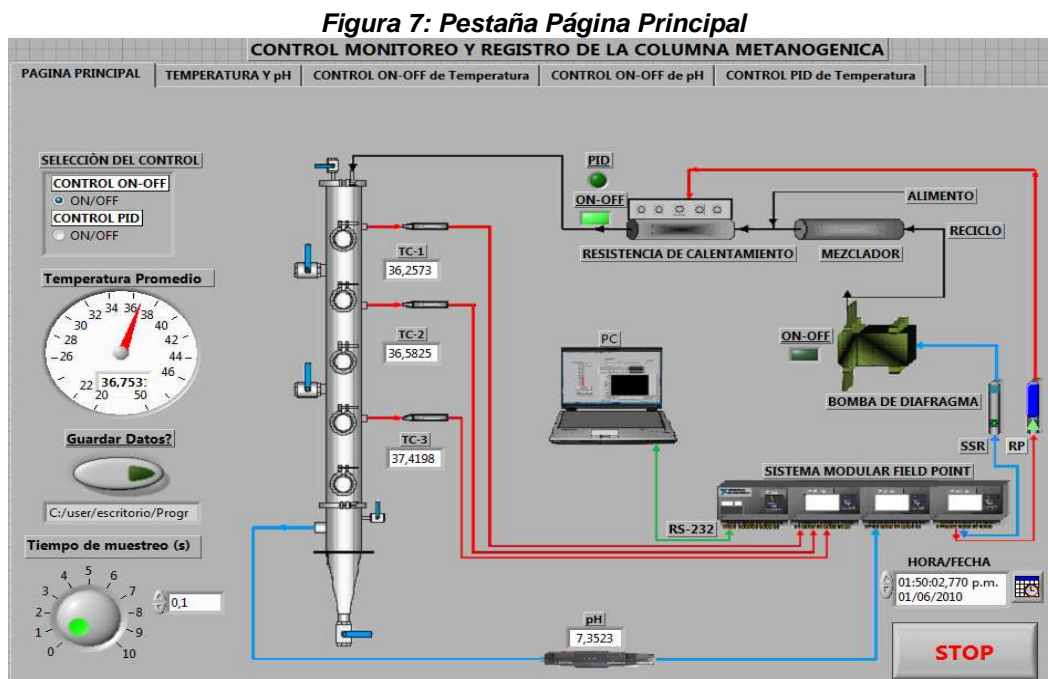
4.1. PROGRAMA DE MONITOREO Y CONTROL

Esta interfaz, se desarrolló para realizar las siguientes actividades:

- Visualizar los valores de la medición de pH y temperatura provenientes del reactor metanogénico
- Almacenar los datos en un tipo de archivo de Excel.
- Ejecutar dos posibles tipos de control para mantener en el rango adecuado las variables del proceso.

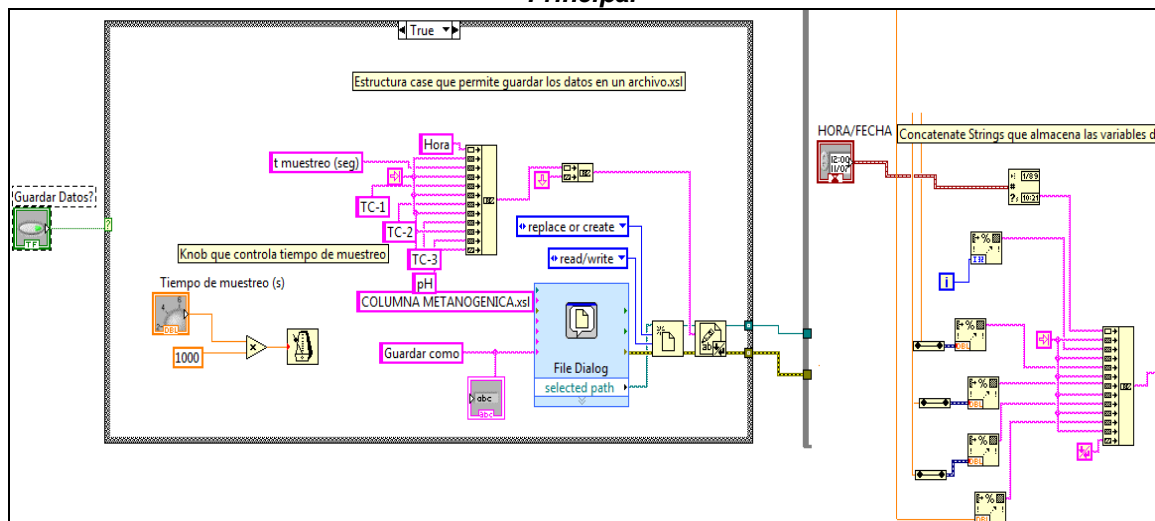
Este programa se desarrollo usando LABVIEW 2009 y está conformado por 4 pestañas que se describen a continuación:

4.1.1. Pestaña Página Principal



FUENTE: Autor

Figura 8: Diagrama de Bloques de la Pestaña Página Principal



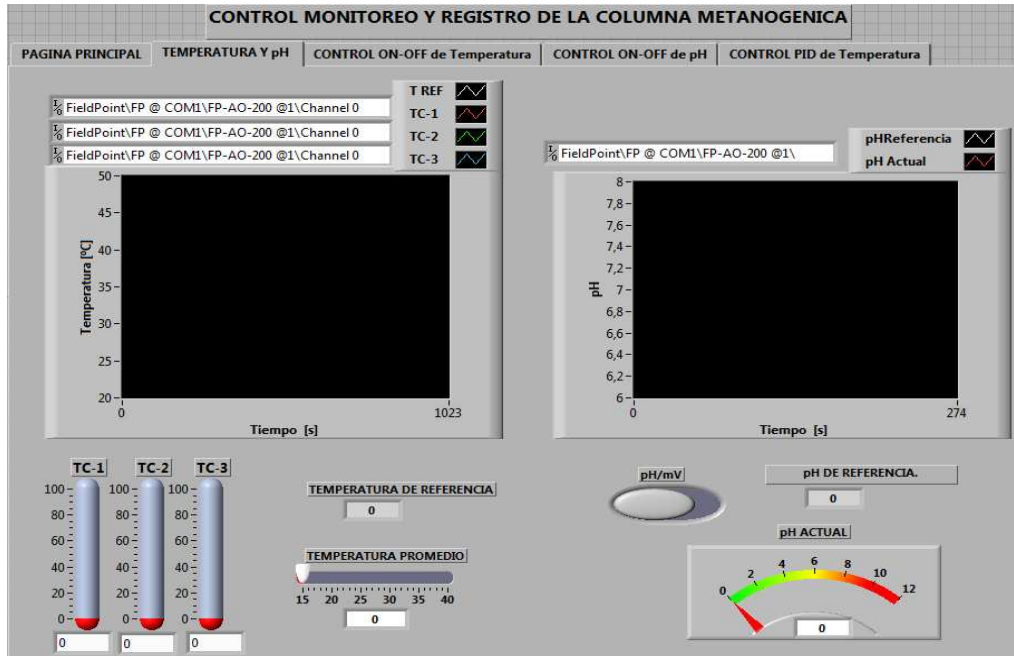
FUENTE: Autor

Esta página se muestra en la figura 8 y su diagrama de bloques en la figura 9. La función de esta pestaña es presentar en tiempo real los valores de pH y temperatura. Cuenta con un selector de tipo de control, control tiempo de muestreo, botón de parada, leds de encendido o apagado y la posibilidad de guardar los datos en un archivo Excel. En el anexo a se describe detalladamente cada pestaña y el correcto manejo de la interfaz.

4.1.2. Pestaña Temperatura y pH

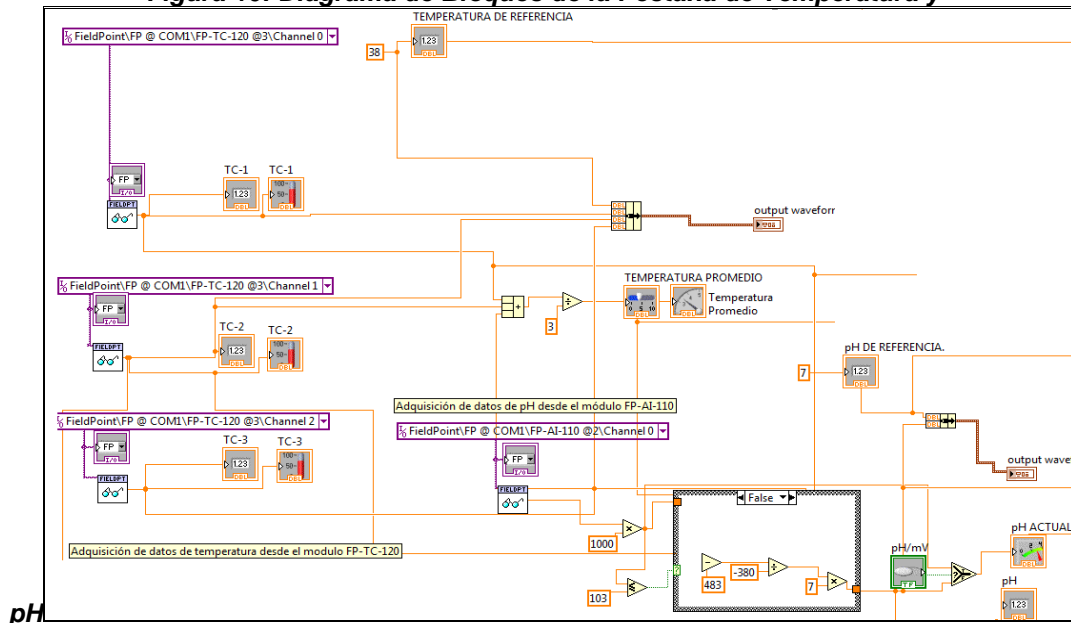
En esta pestaña (ver figura 10) está compuesta por dos indicadores para el valor de referencia, indicadores gráficos y digitales de pH y de temperatura para cada termocupla y un control para seleccionar el tipo de medición de pH, ya sea en escala normal o en milivoltios. La idea de este control es poder verificar en cualquier momento que las unidades de pH estén acordes al rango de voltaje propio del sensor (ver tabla E.2) en base al cual se desarrollo una subrutina en el programa para convertir los milivoltios registrados por el sensor a unidades de pH (figura 11).

Figura 9: Pestaña de temperatura y pH



FUENTE: Autor

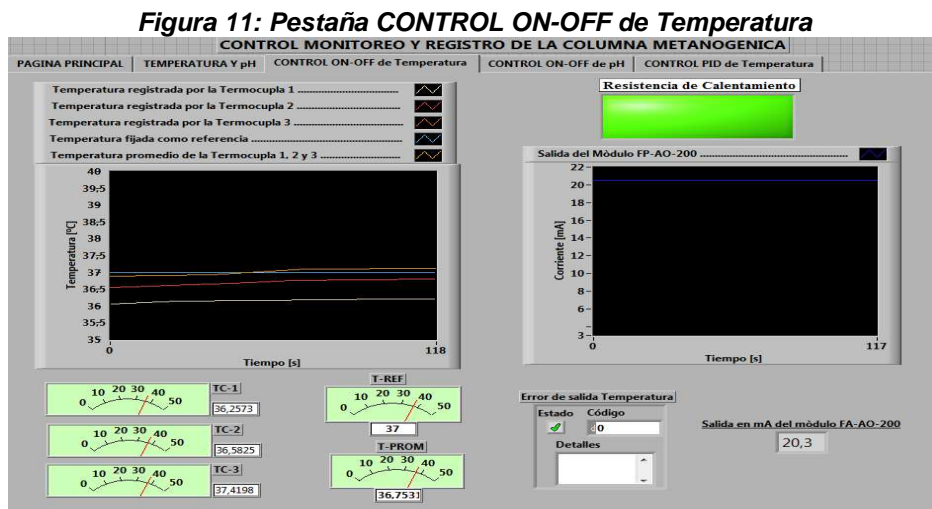
Figura 10: Diagrama de Bloques de la Pestaña de Temperatura y



FUENTE: Autor

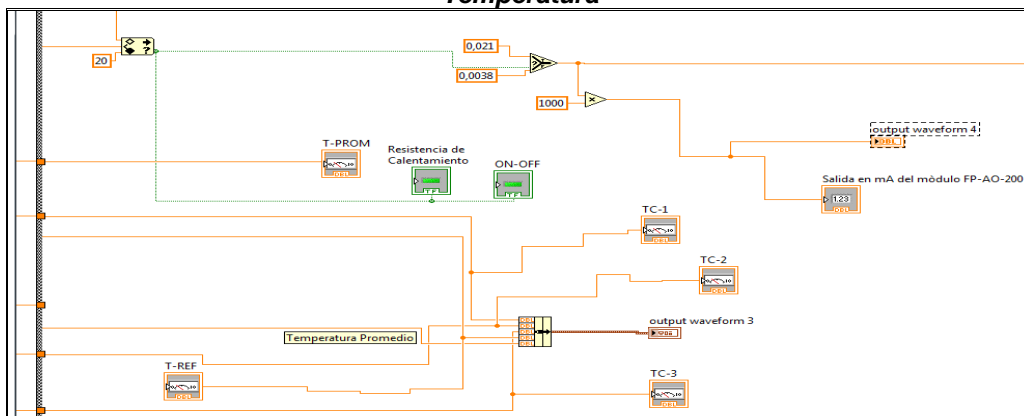
4.1.3. Pestaña CONTROL ON-OFF de Temperatura

Esta pestaña (figura 12) está conformada por un led que se enciende cuando la resistencia de calentamiento lo hace, indicadores gráficos y digitales de la temperatura para las tres termocuplas y de la salida en corriente del módulo FP-AO-200 y un indicador de error. La figura 13 muestra el diagrama de bloques para esta pestaña



FUENTE: Autor

Figura 12: Diagrama de Bloques de la Pestaña CONTROL ON-OFF de Temperatura

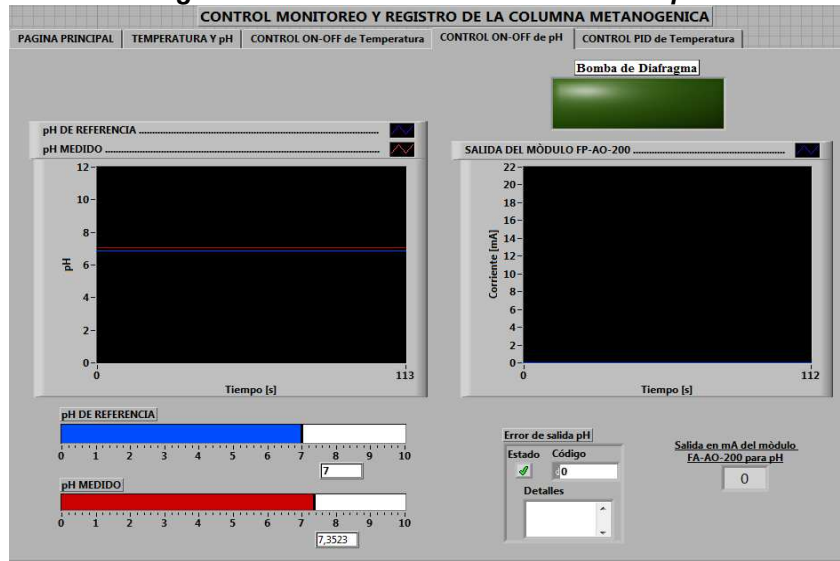


FUENTE: Autor

4.1.4 Pestaña CONTROL ON-OFF de pH

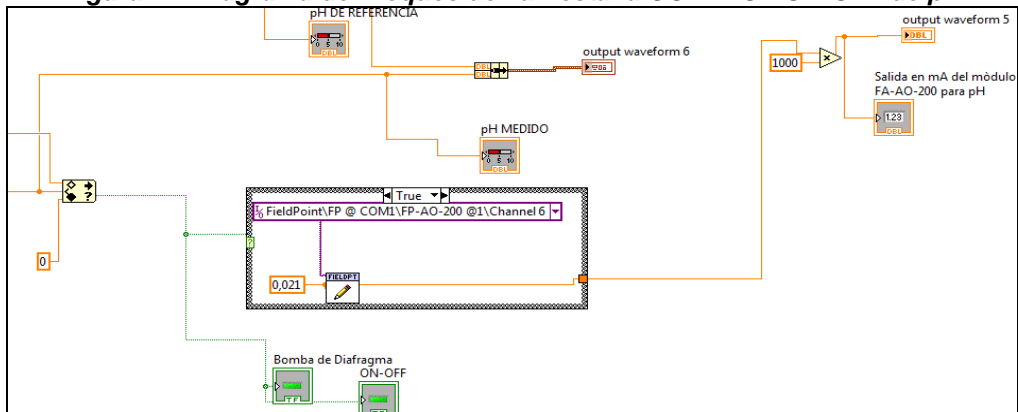
Esta página se muestra en la figura 14 y está conformada por un led, indicadores gráficos y digitales de la temperatura para las tres termocuplas y de la salida en corriente del módulo FP-AO-200 y un indicador de error. El diagrama de bloques para la pestaña de control ON-OFF de pH se muestra en la figura 15.

Figura 13: Pestaña CONTROL ON-OFF de pH



FUENTE: Autor

Figura 14: Diagrama de Bloques de la Pestaña CONTROL ON-OFF de pH

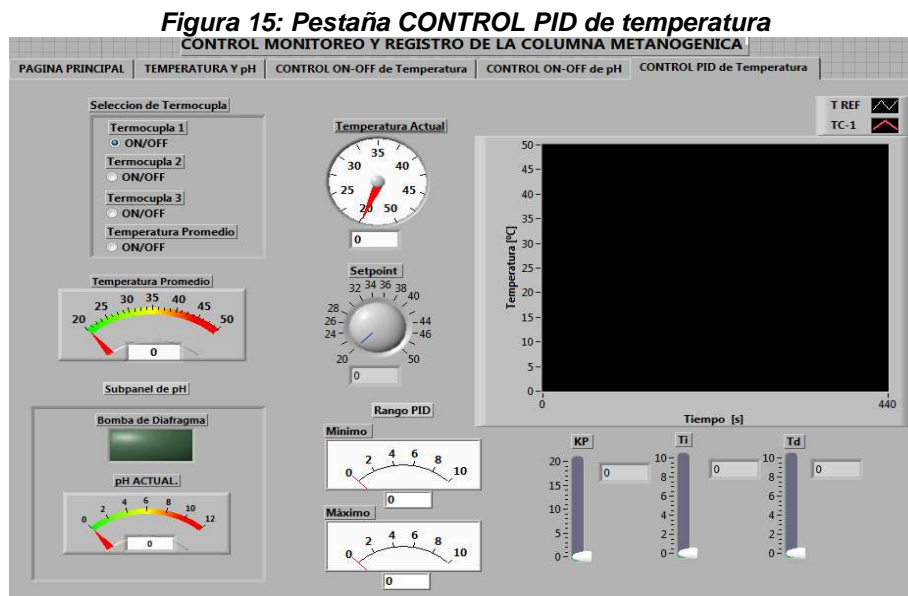


FUENTE: Autor

4.1.5. Pestaña CONTROL PID de Temperatura

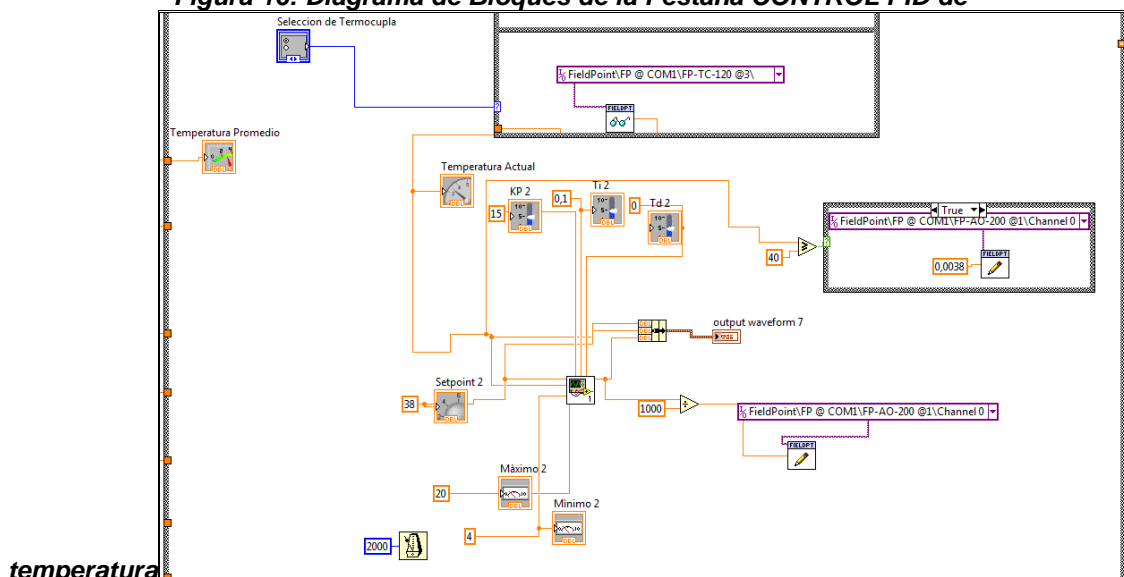
Desde esta pestaña se selecciona cualquiera de las tres termocuplas o la temperatura promedio para compararse con el setpoint. Esta página también cuenta con indicadores para la constante proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo, y el rango de salida del PID, los cuales se fijan directamente desde el diagrama de bloques. Los indicadores gráficos y digitales permiten visualizar en tiempo real la respuesta de la temperatura seleccionada, el setpoint y la salida del canal FP-AO-200. El subpanel de la parte inferior izquierda muestra el comportamiento del pH ya que dado el caso que éste experimentara una variación importante durante la ejecución del control PID, se activara por defecto el control on-off para llevarlo nuevamente al valor fijado.

En la figura 17 se muestra el diagrama de bloques para el control PID que utiliza el variador de potencia en estado sólido, el diagrama de bloques para el control PID con la subrutina PWM se muestra en el anexo B.



FUENTE: Autor

Figura 16: Diagrama de Bloques de la Pestaña CONTROL PID de



FUENTE: Autor

4.2. SINTONIZACIÓN DEL CONTROL PID

Para establecer los valores de K_p , T_i y T_d se recurrió al enfoque experimental de Ziegler y Nicholson y se utilizó el método de respuesta tipo escalón con el cual se obtiene una curva en forma de s de donde es posible obtener los valores del tiempo característico del proceso (τ) y tiempo muerto (t) que se usarán posteriormente en las reglas de sintonización mostradas en la tabla 2.

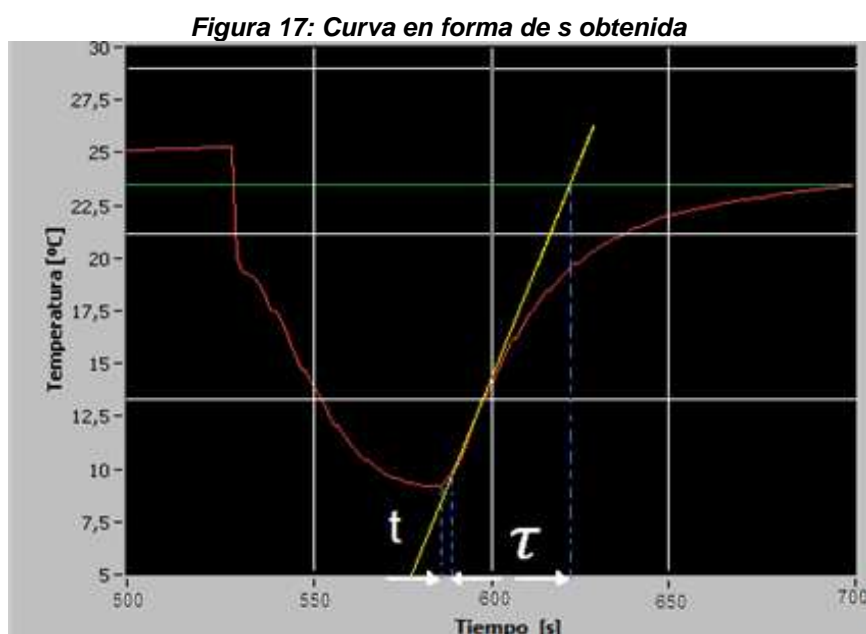
Tabla 2: Regla de Sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de planta

TIPO DE CONTROLADOR	K_P	T_i	T_d
PROPORCIONAL (P)	τ/t	∞	0
PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)	$0,9 * \tau/t$	$t/0,3$	0
PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)	$1,2 * \tau/t$	$2 * t$	$0,5 * \tau$

FUENTE: OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna. Tercera Edición. Ed. Prentice Hall. México. 1998*

A continuación se describe el procedimiento que se utilizó para sintonizar el control PID con el método de respuesta tipo escalón:

1. Se hizo pasar por la columna metanogénica una solución a 10 °C.
2. Se dejó a que la temperatura llegara a un valor estable.
3. A la curva que describió el sistema en forma de S se le trazó una tangente en el punto de inflexión para determinar el tiempo característico del proceso (τ) y tiempo muerto (t)



FUENTE: Autor

La primera fila muestra los parámetros de sintonización obtenidos y la segunda fila los valores ajustados ajuste por prueba y error para obtener un buen control del proceso:

Tabla 3: Parámetros de sintonización para el controlador PID

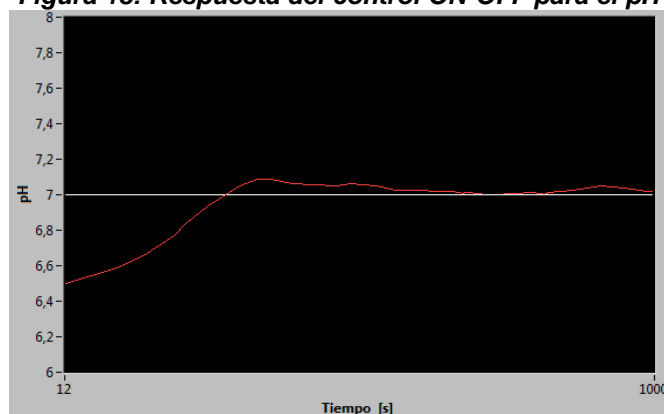
CONTROLADOR	τ (min)	t (min)	K_P (min)	T_i (min)	T_D (min)
PID (Determinado)	0,625	0,05	15	0,1	0,025
PID (Ajustado)			15	0,1	0,000

FUENTE: Autor

4.3. RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE LOS MÉTODOS DE CONTROL

Durante la experimentación, y como se observa en la figura 19, el pH se estabiliza ante una perturbación externa transcurridos 5 minutos y se mantiene en el rango de 7 a 8,5. Esto indica la eficiencia del control ON-OFF para el pH.

Figura 18: Respuesta del control ON-OFF para el pH



FUENTE: Autor

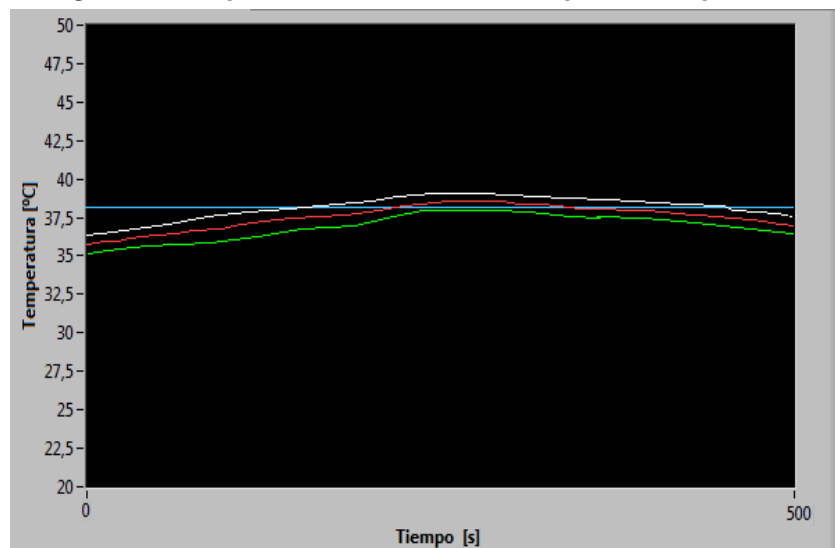
Para el caso de la temperatura, el control ON-OFF tarda alrededor de 30 minutos en llevarla a valores cercanos al setpoint. Este control se realiza con la temperatura promedio del reactor, en la figura 20 se puede ver que las tres termocuplas registran las variaciones simultáneamente, la desventaja de este tipo de control es que una vez alcanzado el setpoint de 38°C la temperatura promedio sigue aumentando ya que la resistencia de calentamiento se mantiene encendida a la máxima potencia y conlleva a que la temperatura aumente más allá del límite establecido y aún con un setpoint de 36 °C se notan variaciones promedio de 4°C

que se dan en intervalos de tiempo relativamente cortos lo cual resulta inconveniente para el metabolismo de los microorganismos.

La respuesta del control PID con PWM se muestra en la figura 21 donde la línea verde es la salida del PID y la roja la temperatura. Cabe aclarar que el controlador PWM implementado por software, no puede dar una mejor respuesta de la que se tendría si este se hiciera en hardware, para esto sería necesario un sistema de adquisición de datos que contara con esta aplicación.

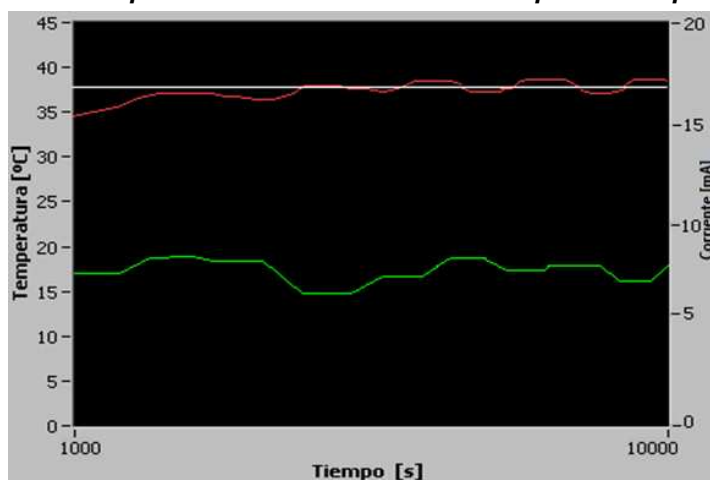
Con este método de control la temperatura se mantuvo más cercana al valor de referencia, pero el tiempo durante el cual permanecía estable no fue suficiente para que los microorganismos se adecuara correctamente al medio, por esta razón, la cantidad de biogás producido fue menor que la obtenida con el control PID con variador de potencia analógico (ver figura 23).

Figura 19: Respuesta del control ON-OFF para la temperatura



FUENTE: Autor

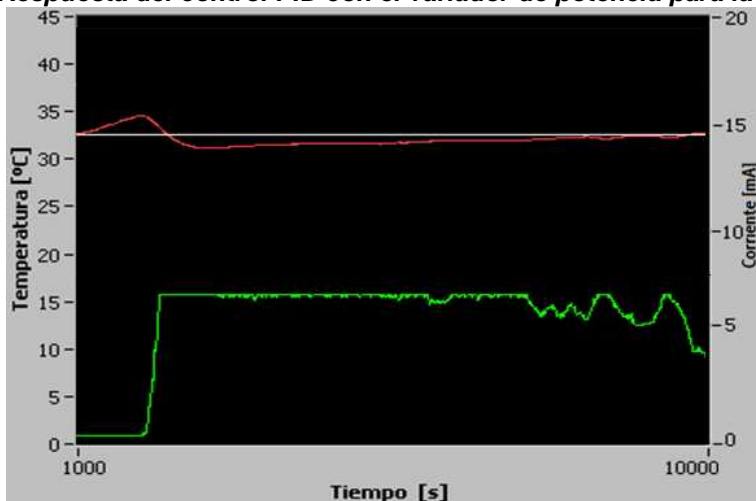
Figura 20: Respuesta del control PID con PWM para la temperatura



FUENTE: Autor

En la figura 22 se observa la respuesta del control PID (línea verde) luego de reemplazarse el relé por el variador de potencia, la temperatura (línea roja) se estabiliza en un valor cercano al setpoint luego de 90 minutos y la variación es apenas de 0,1 °C. Como se puede ver en la figura 23, al permanecer la temperatura estable la producción de biogás será constante.

Figura 21: Respuesta del control PID con el variador de potencia para la temperatura

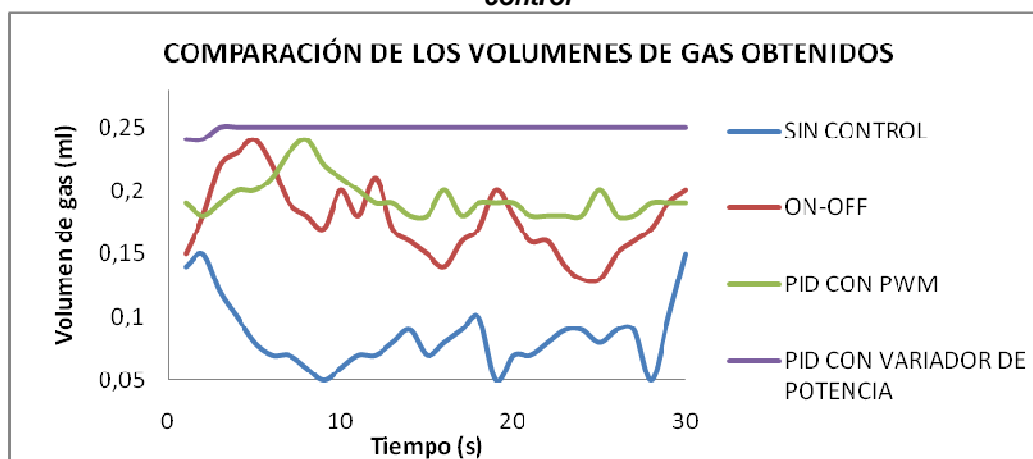


FUENTE: Autor

4.4. RESPUESTA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Con el medidor de biogás que hace parte del sistema metanogénico y que se especifica en el anexo f, se registró el volumen de biogás utilizando un método de control distinto cada vez. En la figura 23 se puede ver el comportamiento de la producción de biogás con cada método de control.

Figura 22: Comparación de los volúmenes de gas obtenidos por los diferentes métodos de control



FUENTE: Autor

La Tabla 4 muestra el porcentaje de eficiencia de un control respecto a otro. PID es el control PID con el variador de potencia, PWM es el control PID con la rutina PWM y SC significa sin control alguno.

Tabla 4: Comparación del porcentaje de eficiencia de los diferentes tipos de control

PORCENTAJE DE EFICIENCIA				
PID/ON-OFF	29,28%		PWM/ON-OFF	8,95%
PID/PWM	22,33%		PWM/SC	56,45%
PID/SC	66,18%		ON-OFF/SC	52,17%

FUENTE: Autor

La producción de biogás con el control PID con variador de potencia es de 0,25 ml/h con el control PID con PWM es de 0,19 ml/h, con el control ON-OFF es de 0,17 ml/h y sin control alguno se tienen 0,084 ml/h. Como el control PID con

variador de potencia mantiene constante la temperatura por más tiempo, la cantidad de biogás producido es mayor que con los otros dos métodos.

Aunque la diferencia entre el biogás obtenido con el método de control PID que utiliza el variador de potencia y el método de control PID con la rutina PWM es baja, la inversión que se realiza al implementar el variador de potencia es mínima y como consecuencia, se obtiene un mejor resultado en cuanto a la producción de biogás.

5. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó una interfaz gráfica para el monitoreo, almacenamiento y control de pH y temperatura de un sistema metanogénico existente en el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales "CEIAM" que facilita el trabajo del operario al evitarle tener que medir estas variables sacando muestras de la columna.

Se probaron diferentes estrategias de control como son el control ON-OFF, control PID con PWM y control PID con variador de potencia analógico y se encontró que el control PID tiene una respuesta más rápida y efectiva que permite mantener la temperatura en un rango estable.

Se comprobó que la producción de Biogás mejora sustancialmente al contar con un método de control. El control PID con controlador de potencia es 29,28% más eficiente que el control ON-OFF y 8,95% más eficiente que el control PID con PWM y a la vez resulta 66,18% más eficiente controlar el sistema metanogénico con la estrategia PID utilizando el variador de potencia, que dejarlo sin método de control alguno.

La técnica de control ON-OFF fue una estrategia exitosa para mantener el pH entre un rango de 6,5 y 7,5. Debido a la poca variación significativa que presentó durante la realización de este trabajo y se concluye que para éste caso en particular, el control de temperatura requiere más atención.

6. RECOMENDACIONES

Dada la estructura del programa y el tipo de respuesta obtenido para la temperatura, se recomienda establecer, para esta variable, un valor de referencia de 36 °C para que el alimento no llegue a calentarse más allá del límite tolerado por los microorganismos cuando se utilice el control ON-OFF.

Se recomienda cambiar la bomba de diafragma como elemento final de control para el pH por una válvula de precisión que pueda controlarse desde la interfaz para que cuando sea necesaria una regulación fina del pH no se presenten inconvenientes de dosificación.

Se recomienda instalar un sensor para medir la cantidad de biogás producido e integrarlo a la interfaz gráfica desarrollada para que de esta forma el proceso quede completamente automatizado.

Se recomienda verificar periódicamente los valores registrados en milivoltios por el sensor de pH y compararlo con el rango especificado en el anexo tal y si es preciso, realizar el respectivo ajuste en el programa.

Se recomienda leer detenidamente el anexo A para garantizar el correcto funcionamiento de la interfaz y por ende, del sistema metanogénico.

7. BIBLIOGRAFIA

GHOSH, S. Memorias del II Simposio Internacional de Digestión Anaerobia de Residuos Solidos. Vol 1. Ed. Reverté S.A. Barcelona 1999

FILHO, R y DE ASSIS, Adilson. Computers and Chemical Engineering. Vol 24. 2000.

MARTÍNEZ, R., Guillermo A. y RODRÍGUEZ W. Carolina. Diseño y Construcción de un Biodigestor Anaerobio de Lecho Fijo para Operación en Continuo a Escala Piloto con Control de Temperatura y pH. Bucaramanga, 2007. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

KRUMBEIN W. Microbial Geochemistry. Ed. Blackwell Publications. Boston.1983.

STANIER, Roger., INGRAHAM, John., WHEELIS, Mark., PAINTER, Page. Microbiología. Ed. Reverté S.A. Barcelona.1989.

SMITH, Carlos A. y CORRIPIO, Armando B. Control Automático de Procesos. Cuarta Edición. Editorial Limusa, México. 1997.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Tercera Edición. Ed. Prentice Hall. México. 1998

DAVIS, Enrique. Tutorial Básico para utilizar Measurement & Automation de National Instruments con labview 5,1. Mérida.2000

RITTMANN, Bruce E. y MacCARTY, Perry L. Biotecnología del Medio Ambiente, Principios y Aplicaciones. Ed. McGraw-Hill. España 2001

PERRY, Robert H., GREEN, Don W. y MALONEY, James O. Manual del Ingeniero Químico. Ed. Mc Graw-Hill. México 2000

NATIONAL INSTRUMENTS. Conceptos de Ingeniería con NI Labview. <<http://www.ni.com/es/>> [citado en 15 de mayo de 2010]

OPTEC. Soluciones en Potencia. <<http://www.optecpower.com/>> [citado en 28 de mayo de 2010]

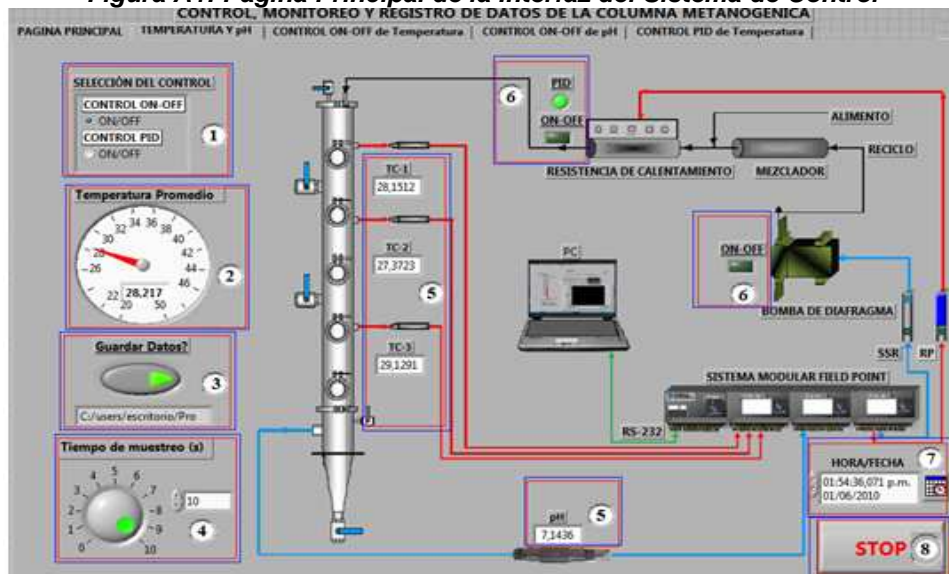
NATIONAL INSTRUMENTS. PID Control Toolkit User Manual. <<http://www.ni.com/es/>> [citado en 05 de marzo de 2010]

BLOBSERVER, Contadores de gas. <<http://www.blobserver.com/medidaexacta/>> [citado en 01 de agosto de 2010]

ANEXOS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN Y MANEJO DE LA INTERFAZ

Figura A1: Pagina Principal de la Interfaz del Sistema de Control



FUENTE: Autor

A continuación se detalla y se describe la forma correcta de manejar la interfaz:

Página Principal

La función de esta pestaña es permitir la visualización en tiempo real de los valores de pH y temperatura; está conformada por:

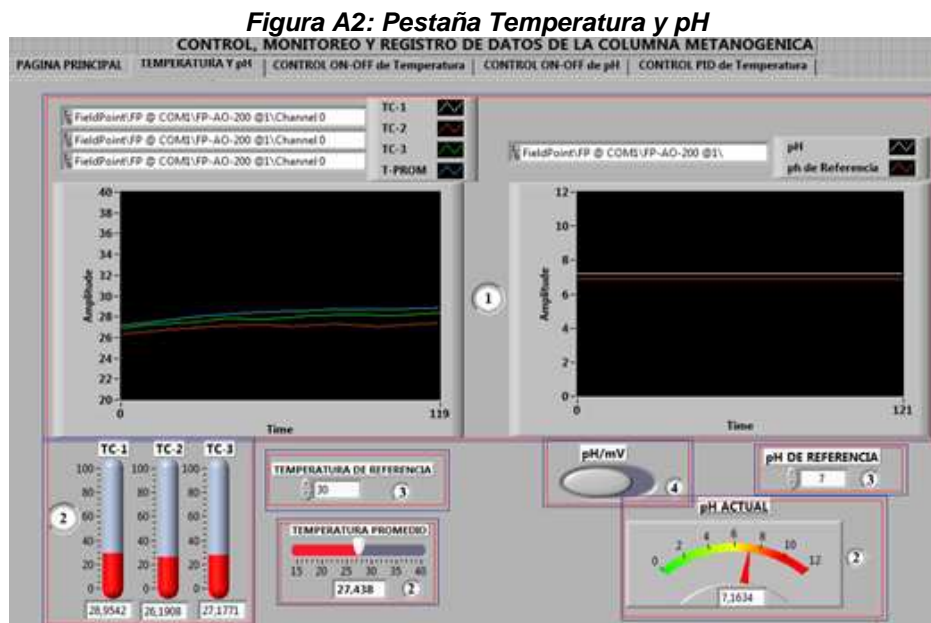
1. Radio Button: Permite seleccionar el tipo de control a utilizar. Esta es la primera selección que debe hacerse al utilizar el programa.
2. Indicador de la temperatura promedio.
3. Control Guardar: Al activarlo se guardan los datos en un archivo Excel.
4. Control de Tiempo de Muestreo: Establece la periodicidad con que se desean adquirir los datos.
5. Indicadores de temperatura y pH en tiempo real.
6. Leds: Se encienden o apagan indicando el comportamiento de los elementos de control.

7. Indicador de hora y fecha
8. Boton Stop: Detiene el programa

Pestaña Temperatura y pH

En esta pestaña se deben seleccionar los valores de referencia para pH y temperatura, también muestra en todo momento, sin importar el tipo de control seleccionado, el comportamiento de estas variables. Esta pestaña está conformada por:

1. Graficas indicadoras del comportamiento de las variables de operación.
2. Indicadores de temperatura, temperatura promedio y pH.
3. Setpoint. Permite fijar los valores de referencia para pH y temperatura.
4. Control selector para el pH. Permite ver el pH ya sea en unidades comunes de pH o en milivoltios



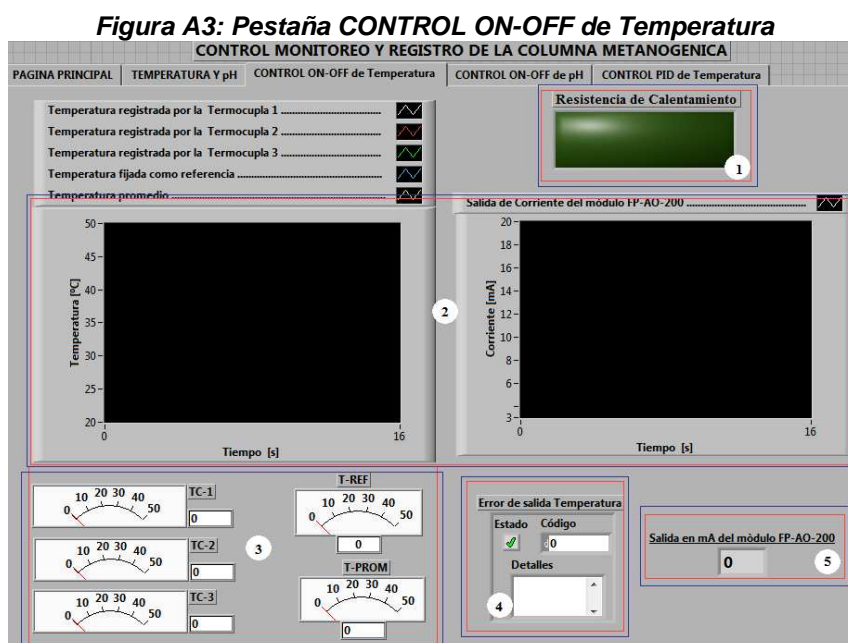
FUENTE: Autor

El selector pH/mV permite verificar que las unidades de pH que se están obteniendo sean acordes al rango especificado por el fabricante del sensor.

Pestaña CONTROL ON-OFF de Temperatura

Esta página carece de control alguno y es exclusivamente para visualizar la respuesta al tipo de control ON-OFF. Está conformada por:

1. Led. Indica si la resistencia de calentamiento se encuentra encendida o apagada.
2. Indicadores gráficos de la temperatura registrada por cada una de las termocuplas, la temperatura de referencia y la temperatura promedio, la grafica de la derecha muestra la corriente que sale del módulo FP-AO-200.
3. Indicadores digitales de la temperatura sensada por cada termocupla.
4. Indicador de error en la ejecución de este control.
5. Indicador digital de la salida de corriente que se está mostrando en la respectiva grafica.

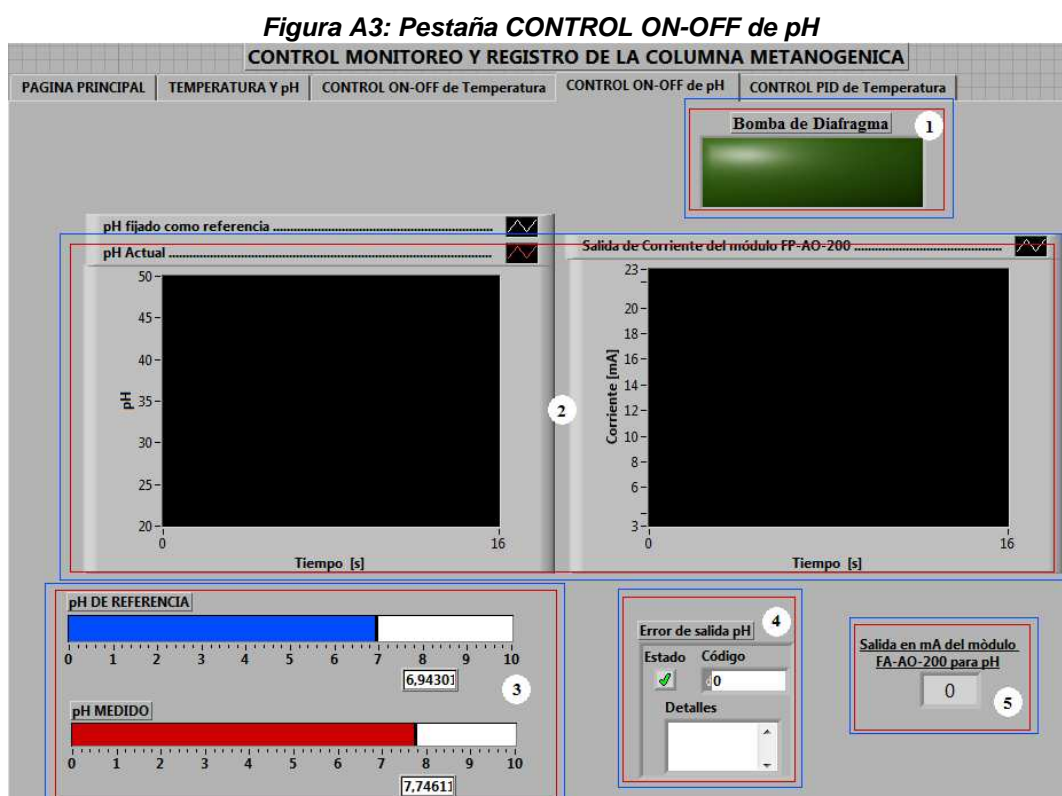


FUENTE: Autor

Pestaña CONTROL ON-OFF de pH

Esta página carece de control alguno y es exclusivamente para visualizar la respuesta al tipo de control ON-OFF para el pH. Está conformada por:

1. Led. Indica si la bomba de diafragma se encuentra encendida o apagada.
2. Indicadores gráficos del pH registrado y el pH establecido como referencia. La grafica de la derecha muestra la corriente que sale del módulo FP-AO-200.
3. Indicadores digitales del pH sensado por cada termocupla.
4. Indicador de error en la ejecución de este control.
5. Indicador digital de la salida de corriente que se está mostrando en la respectiva grafica.

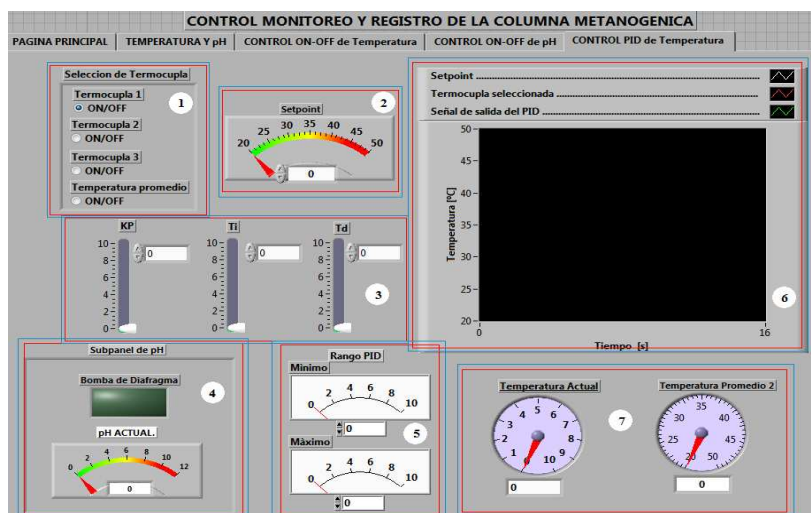


FUENTE: Autor

Pestaña CONTROL PID de Temperatura

1. Control Selector de Temperatura: Permite seleccionar la temperatura que se va a comparar con el Setpoint
2. Control Digital: Permite ingresar el valor del setpoint característico del proceso.
3. Controles Deslizantes: Permiten ajustar desde el diagrama de bloques la constante proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo
4. Subpanel de pH: Muestra la variación del pH en tiempo real y el led permite saber si la bomba de diafragma esta encendida o no.
5. Rango PID: Permite establecer desde el diagrama de bloques, el rango de salida del PID que limitará la cantidad de corriente que se envía a la resistencia de calentamiento, como el modulo esta configurado para enviar de 4 a 20 mA, por defecto el rango mínimo se establece en 4 y el máximo en 20.
6. Indicador Grafico: Muestra en tiempo real el setpoint, la temperatura que se esta controlando y la salida del PID.
7. Indicadores Digitales: Muestran el comportamiento de la temperatura en tiempo real.

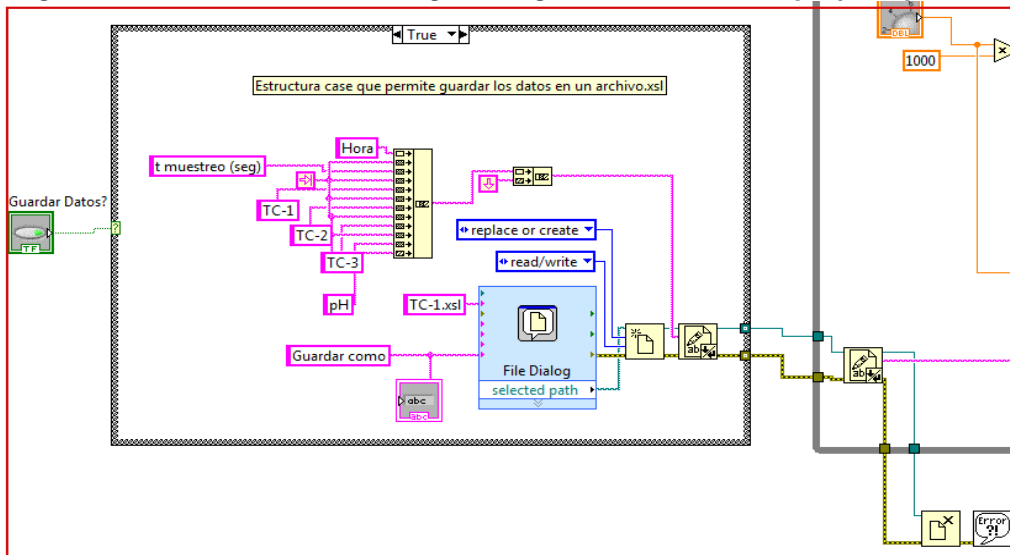
Figura A4: Pestaña CONTROL ON-OFF de pH



FUENTE: Autor

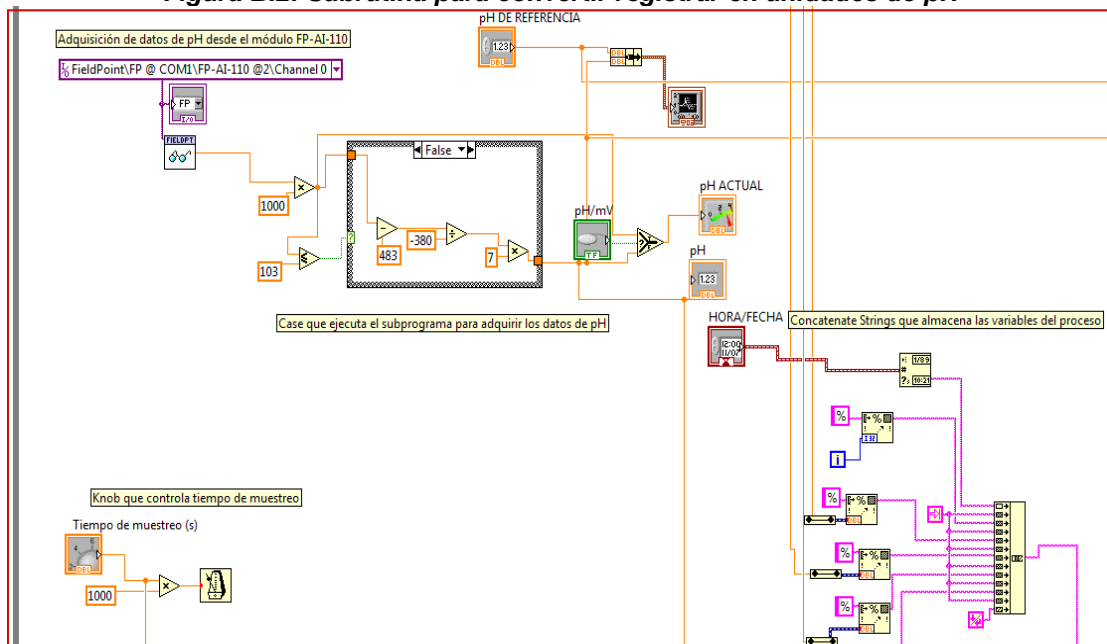
ANEXO B. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

Figura B.1: Estructura case encargada de guardar los datos de pH y temperatura



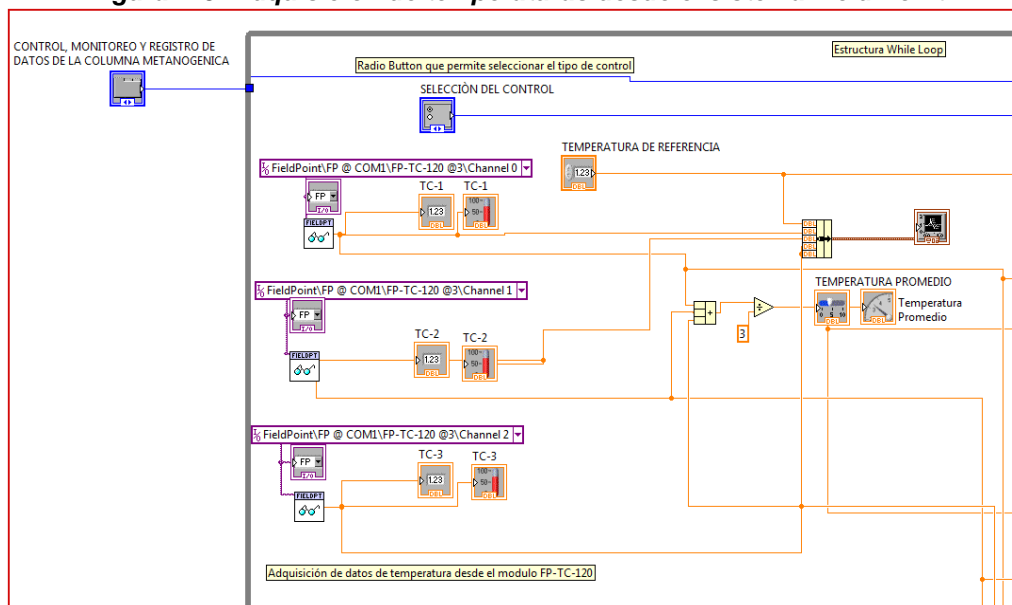
FUENTE: Autor

Figura B.2: Subrutina para convertir registrar en unidades de pH



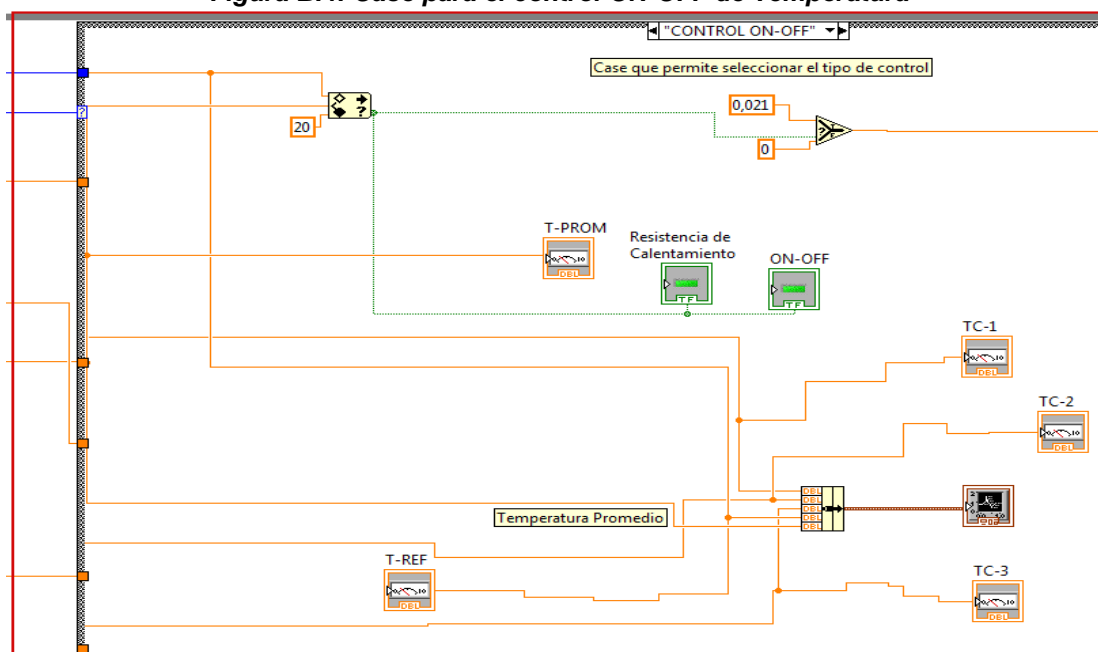
FUENTE: Autor

Figura B.3: Adquisición de temperaturas desde el sistema Field Point



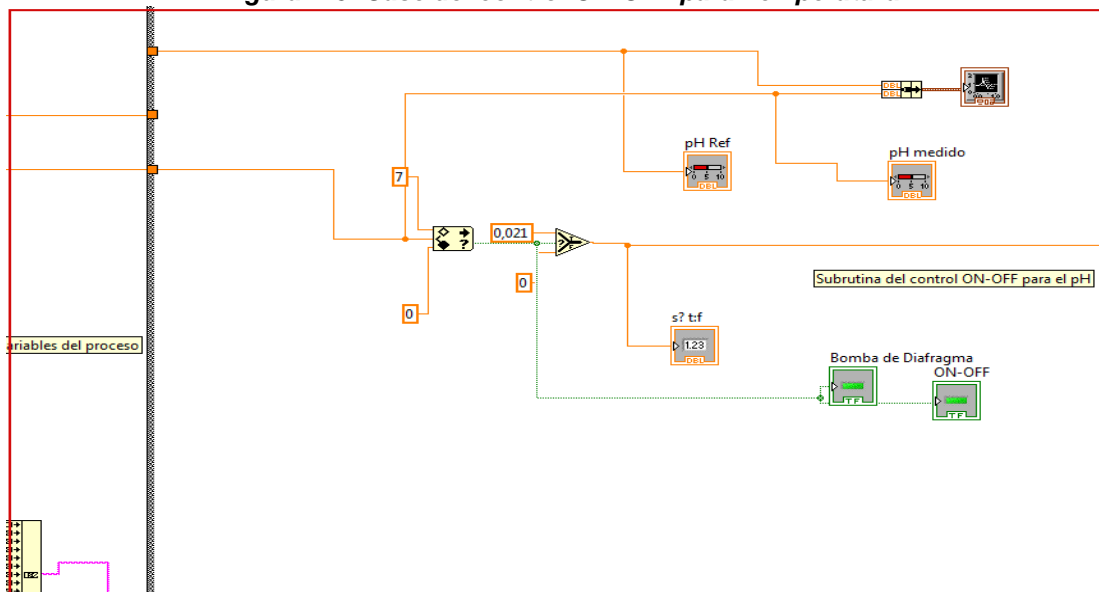
FUENTE: Autor

Figura B.4: Case para el control ON-OFF de Temperatura



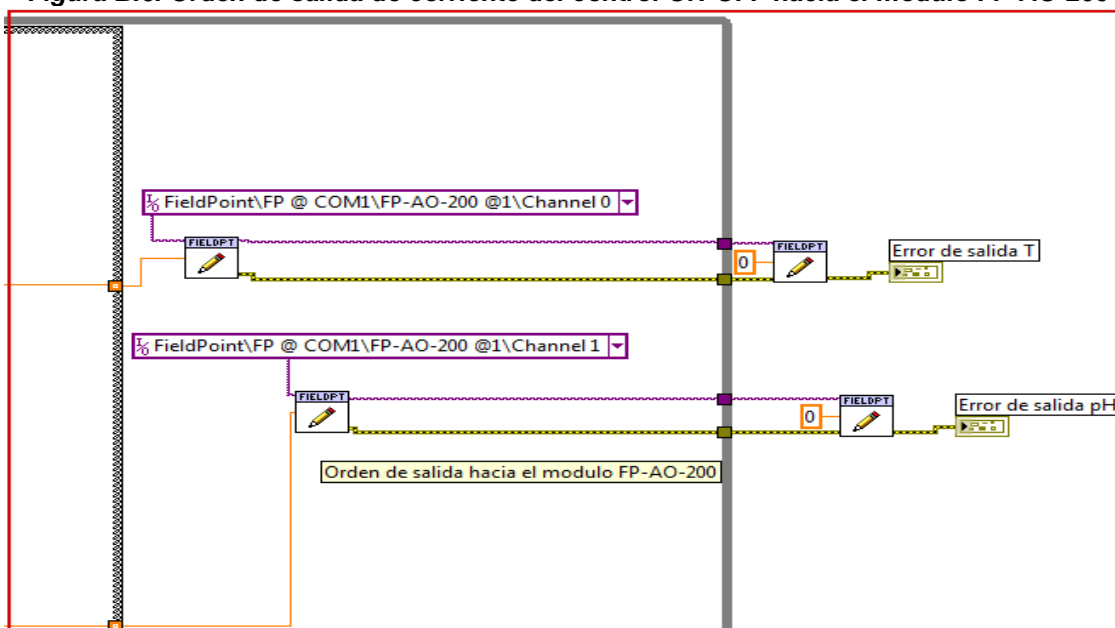
FUENTE: Autor

Figura B.5: Case del control ON-OFF para Temperatura



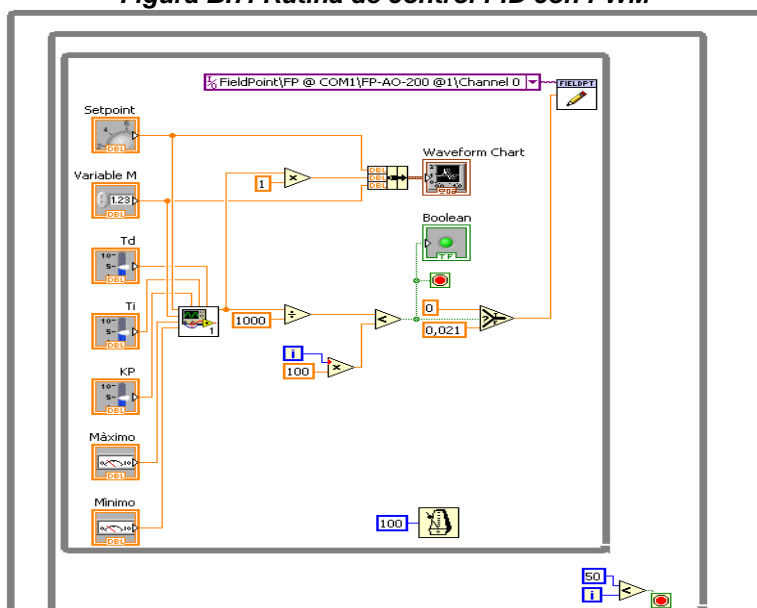
FUENTE: Autor

Figura B.6. Orden de salida de corriente del control ON-OFF hacia el módulo FP-AO-200



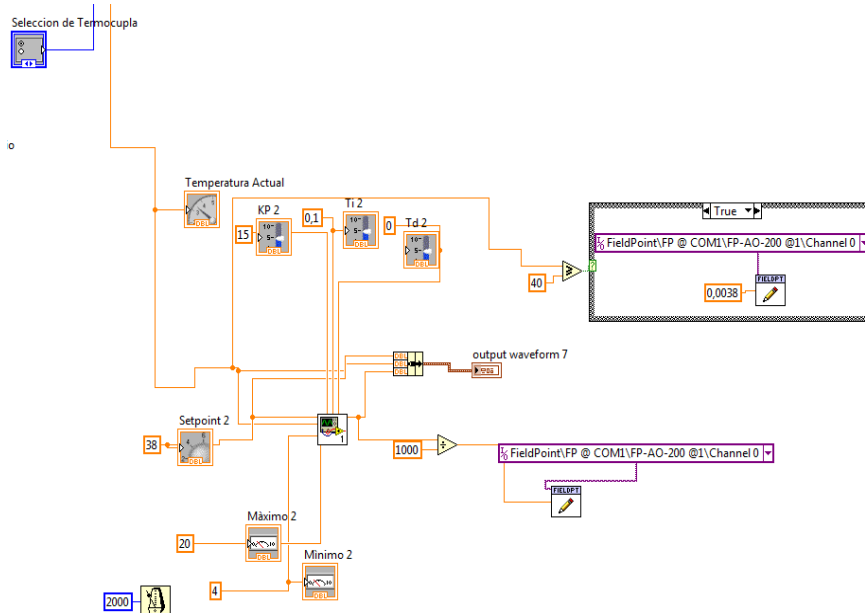
FUENTE: Autor

Figura B.7: Rutina de control PID con PWM



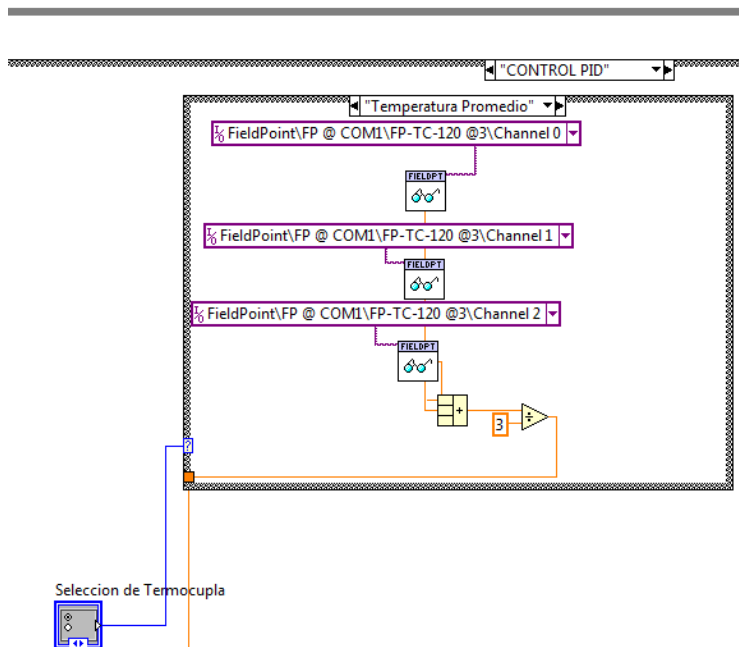
FUENTE: Autor

Figura B.8: Control PID con el controlador de potencia



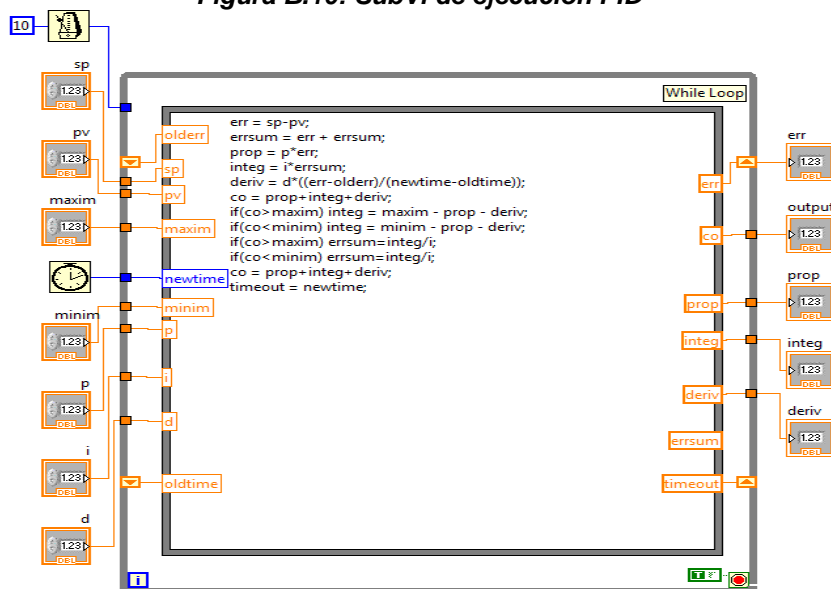
FUENTE: Autor

Figura B.9: Case Selector de la temperatura a compararse con el PID



FUENTE: Autor

Figura B.10: SubVi de ejecución PID



FUENTE: Autor

ANEXO C. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL ALIMENTO DEL REACTOR

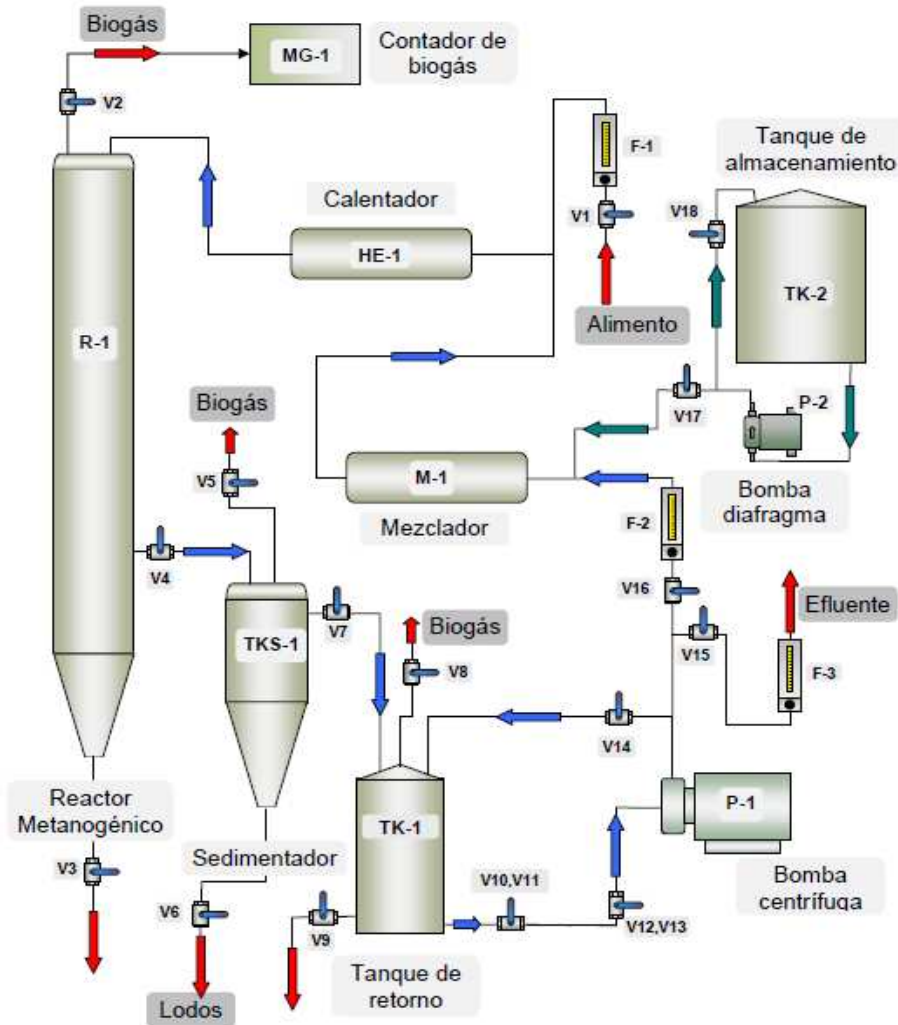
Tabla C1. Caracterización fisicoquímica del alimento para el reactor metanogénico

Tamaño de partícula	2-4 mm	Medida Directa
Densidad real	1100 kg/m ³	Medida Directa
Densidad aparente	904,2 kg/m ³	Medida Directa
Sólidos totales	168,3 kg/m ³ 16,0-18,0 %(p/p)	Gravimétrica 2540 E
Sólidos volátiles	158,8 kg/m ³ 15,1%(p/p) 94,4% ST	Gravimétrica 2540 E
Carbono Orgánico Total	39,0-48,0%(p/p)	Combustión Infrarroja 5310 B
Nitrógeno Total	0,35-1,19%(p/p)	Macro Kjeldalh 4500-N _{org} B
Potasio	2,46%(p/p)	Absorción Atómica 3500-K B
Fósforo	0,22%(p/p)	Acido Vanadomolibdofosfórico 4500-P C
Relación C/N	32,77	

FUENTE: CEIAM-UIS

ANEXO D. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA METANOGÉNICO

Figura D.1. Esquema del Sistema Metanogénico



FUENTE: MARTÍNEZ R., Guillermo A y RODRÍGUEZ W., Carolina. Diseño y Construcción de un Biodigestor Anaerobio de Lecho Fijo Para Operación en continuo a Escala Piloto con Control de Temperatura y pH. Bucaramanga 2007. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

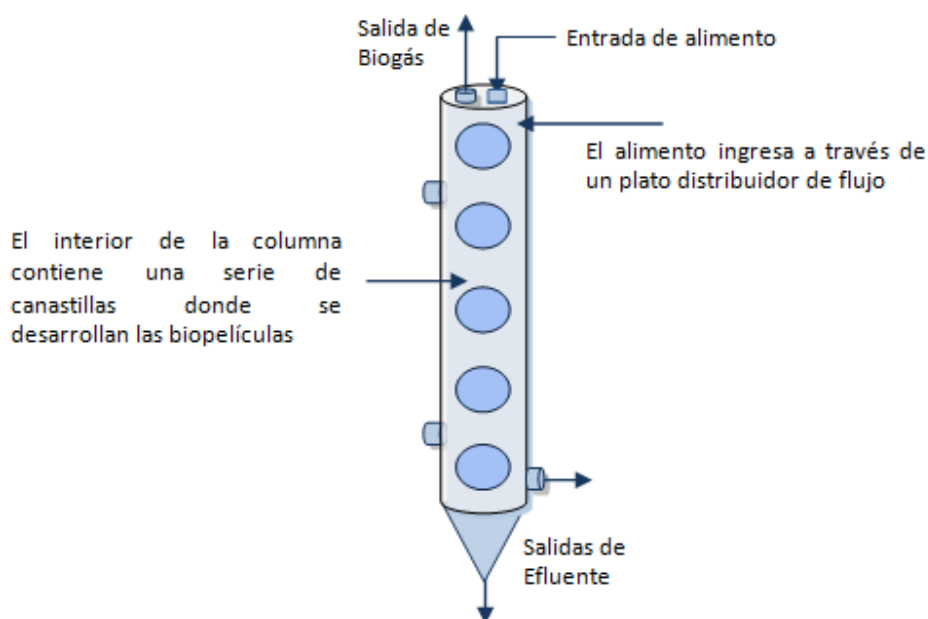
El tiempo de residencia hidráulico de diseño para el *reactor* (R-1) es de 5,3 días. El efluente que abandona el reactor pasa a un *sedimentador cónico* (TKS-1). El líquido que sale de este equipo llega a un *tanque cilíndrico* (TK-1) y es recibido por la *bomba*

centrifuga (P-1). Una parte del flujo descargado por P-1 es retornado hacia TK-1 y la otra parte se divide posteriormente en dos corrientes: una que sale finalmente del proceso y otra que es retornada hacia el reactor.

El líquido de recirculación es conducido hacia un dispositivo equipado con baffles internos (M-1) donde se mezcla con una solución utilizada para el ajuste del pH. Esta corriente junto con el alimento fresco pasa a través del *calefactor* (HE-1) rodeado por la *resistencia de abrazadera* (150 W a 120 V). El fluido que pasa a través de HE-1 se calienta según la acción de control, así se regula la temperatura dentro del reactor. El caudal de reciclo, de alimento fresco y de salida del sistema se fijan con los *rotámetros* (F-1, F-2 y F-3).

En la siguiente figura se especifica el funcionamiento del reactor:

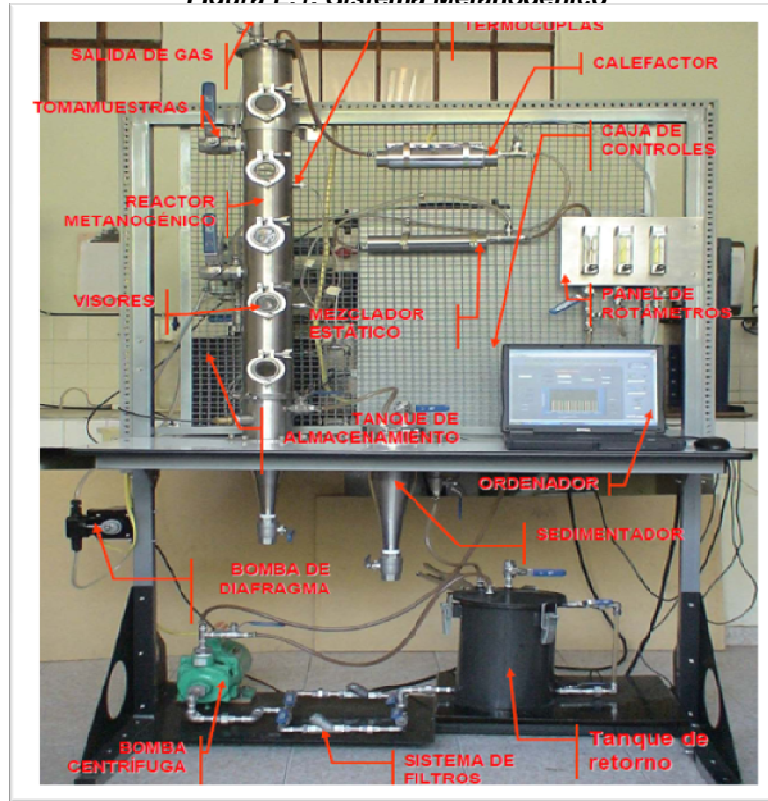
Figura D.2. Esquema del funcionamiento del biodigestor anaerobio



La solución utilizada para el ajuste de pH es almacenada en un *tanque cilíndrico* (TK-2) y dosificada por medio de una *bomba de diafragma* (Blue-White, Ref.:C-660P; 0,29 L/min a 60 psi). El biogás producido como resultado de la digestión sale por el tope del reactor y es conducido a un medidor de gas. El reactor fue instrumentado con tres termocuplas tipo J y un electrodo de pH en línea (Oakton, Ref.: WD-35806-21).

ANEXO E. EQUIPOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA METANOGÉNICO

Figura E.1. Sistema Metanogénico



FUENTE: CEIAM-UIS

Los equipos que componen el sistema metanogénico se describen a continuación:

Tabla E.1. Especificaciones del equipo principal

CUERPO DEL REACTOR	ZONA DE SEDIMENTACION	TOTALES
Diámetro externo: 10,2cm	Altura zona sedimentación: 34cm	Altura total: 145,8cm
Diámetro interno: 9,7cm	Diámetro superior sección cónica: 4"	Volumen total: 8,82L
Altura zona empacada: 100,7cm	Diámetro inferior sección cónica: 1"	Material: Acero inoxidable
Volumen zona empacada: 7,09L	Volumen zona de sedimentación: 1,73L	316

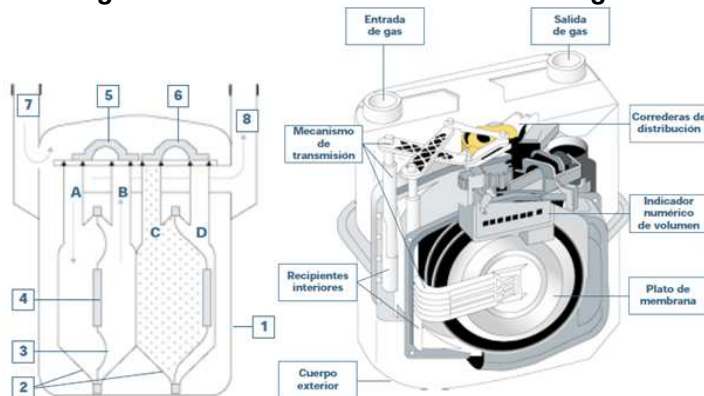
Tabla E.2. Especificaciones de los equipos secundarios

INSTRUMENTO	ESPECIFICACIONES	FUNCIÓN
Resistencia de calentamiento tipo abrazadera	Longitud 20cm, diámetro externo 2", potencia de 150W, 120V y aislamiento de asbesto.	Regular la temperatura dentro del reactor.
Termocuplas tipo J	Composición: Fe- CuNi Rango: -200 a 700 °C	Medir la temperatura en tres partes del reactor.
Electrodo de pH Referencia: WD-35806-21	Cuerpo CPVC, rango de pH 0 a 12, Equivalencias en milivoltios: pH=7=103 mV, pH=12=-373 mV, pH=4=266 mV. Solución de referencia KCl/AgCl, temperatura máxima 80°C.	Medir el pH dentro del reactor.
Bomba centrífuga marca Barnes, modelo MC-2, motor Siemens monofásico	Flujo nominal (14,2psi) 10GPM, potencia de 1/4hp, 127V, 4,2ª y diámetro de carga y descarga 1"	Impulsar el fluido de recirculación al sistema.
Bomba de diafragma marca Blue-White, Modelo C660P	Potencia de 45W, 115V, 0,45ª y flujo máximo (a 60psi) 17,4	Impulsar la solución para ajuste de pH desde el tanque de almacenamiento hasta el mezclador.
Caja de controles	Metálica, 70 cm de largo, 60cm de ancho y 39 de fondo.	Aloja el sistema FieldPoint, relés de estado sólido, regulador de potencia y elementos de protección.
Mezclador	Longitud 25cm, diámetro externo 4,8cm, volumen 0,348L, distancia entre baffles 3,4cm, conexiones de entrada y salida de ¼".	Mezclar la corriente de recirculación con la solución para el ajuste de pH.

ANEXO F. DESCRIPCIÓN DEL MEDIDOR DE GAS

El contador de gas consta de un cuerpo exterior (1) provisto de dos conexiones de entrada y salida del gas, y de dos recipientes interiores (2), cada uno de ellos dividido en dos compartimentos por una membrana (3) impermeable al gas, provista de un plato central (4) que las hace rígidas.

Figura 3: Funcionamiento del medidor de gas



FUENTE: BLOBSEVER, Contadores de gas.
<<http://www.blobserver.com/medidaexacta/>>

Cada placa va mecánicamente unida a través de un mecanismo de ejes y palancas, a dos correderas externas de distribución (5 y 6) situadas en la parte superior del contador, que tienen la función de abrir y cerrar los registros de entrada o salida (A-B y C-D) de los dos compartimentos de cada recipiente interior, que gracias al movimiento de la corredera, se comunican alternativamente con los conductos de entrada (7) y salida (8) del contador. La presión del gas de entrada incide siempre sobre uno de ambos lados de la membrana, estando la boca de salida del otro compartimento en comunicación con el conducto (8) de salida de gas del contador. Por diferencia de presiones, el gas que está llenando uno de ambos compartimentos, obliga a que la membrana se desplace y evacue el gas del otro compartimento hacia la salida. El movimiento de las dos membranas y las respectivas correderas se halla desfasado para evitar puntos muertos y para que el gas fluya de un modo prácticamente uniforme. El volumen medido en cada ciclo completo es de cuatro veces el volumen que desplaza cada membrana en un desplazamiento simple. El movimiento se transmite así mismo al mecanismo de ruedas dentadas del cabezal, provisto de un indicador numérico del volumen medido.⁹

⁹ BLOBSEVER, Contadores de gas. <<http://www.blobserver.com/medidaexacta/>> [citado en 01 de agosto de 2010]

ANEXO G. SISTEMA MODULAR FIELD POINT

Figura G.1. Fotografía de los módulos del sistema FieldPoint



FUENTE: Autor

El sistema modular de Entrada/Salida (E/S) FieldPoint (FP) de National Instruments (NI) para monitoreo, registro y control, está compuesto por un banco de cuatro módulos para esta aplicación en particular; módulo de red FP-1000, módulo de entrada analógico en voltaje o corriente FP-AI-110, módulo de salida analógico en corriente FP-AO-200 y módulo de entrada analógico para termocuplas estándar FP-TC-120. Cada módulo de entrada o salida está montado sobre una Base Terminal Isotérmica o Universal. Además una fuente de 24 VDC de NI suministra la alimentación de potencia al banco. La comunicación con el ordenador, se hace a través del puerto serial RS-232, por tanto se requiere del correspondiente cable de interfaz. El software de configuración para este sistema FP es el MAX (Measurement & Automation Explorer).

Todos los módulos brindan un puente de distribución de potencia para hacer más fácil la alimentación de sensores o para lazos de corriente externos y cuentan con conexiones del tipo terminales de tornillo. Todos los módulos brindan protección contra sobre voltaje transitorio de 2,300 V_{rms} entre los canales de entrada y tierra. La Temperatura de operación para todos los módulos está en el rango -40 a 70 °C. Todos los módulos vienen con certificados de calibración trazable expedidos por el NIST (National Institute of Standards and Technology) para asegurar la precisión y fiabilidad de las medidas y el control analógicos

Tabla G.1. Especificaciones de los módulos de entrada y salida

	FP-AI-110	FP-TC-120	FP-AO-200
CANALES	8 en corriente o voltaje	8 entradas diferenciales en voltaje	8 salidas en corriente
RANGOS DE LOS CANALES	0-1 V, 0-5 V ±60 mV, ±300 mV ±1 V, ±5 V, ±10 V 0-20 mA, 4-20 mA	±25 mV, ±50 mV, ±100 mV, -20-80 mV	0-20, 4-20 mA
RESOLUCIÓN DEL CONVERTIDOR	±20 mA 16 bits a 50 o 60 Hz	16 bits	12 bits
TIPO ADC	10 bits a 500 Hz Delta-sigma	Delta-sigma	
REQUERIMIENTOS DE POTENCIA	350 mW	350 mW	350 mW
AISLAMIENTO SOBREVOLTAJES CONTINUOS	250,0 V _{rms}	250,0 V _{rms}	No

FUENTE: *Manual de Instrucciones para el usuario de National Instruments*

ANEXO H. ESPECIFICACIONES DEL VARIADOR DE POTENCIA

Para realizar el control PID se adquirió un variador de potencia OPI48P25G de control de fase microcontrolado de entrada 4-20 mA y salida proporcional 110/120/440 VAC.

Figura H.1. Esquema de control por corriente 4-20 mA

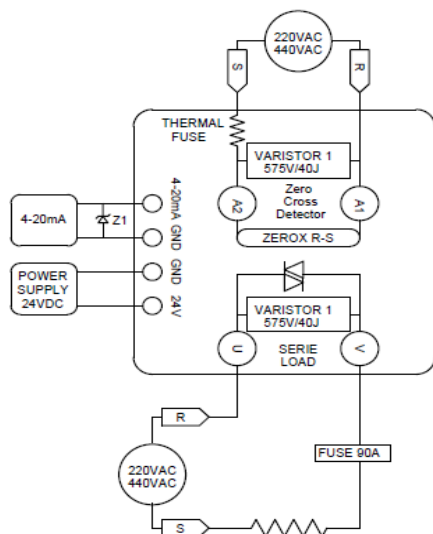
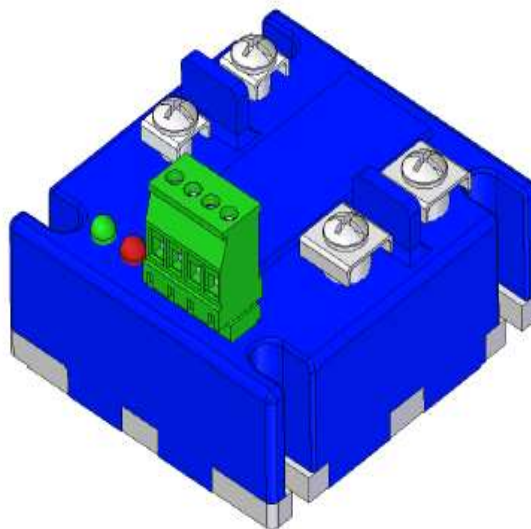


Figura H.2. Variador de potencia 1 fase integrado



FUENTE: OPTEC. Soluciones en Potencia. <http://www.optecpower.com/>

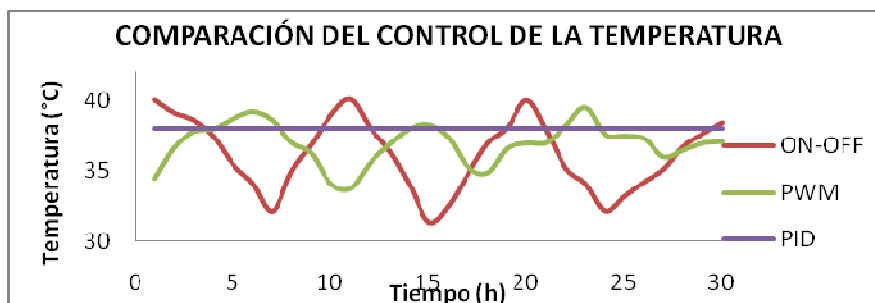
FUENTE: OPTEC. Soluciones en Potencia. <http://www.optecpower.com/>

Los variadores de potencia de estado sólido por control de fase microcontrolados son destinados a procesos industriales donde se requiere alta precisión. La salida en estado sólido, permite ajustar la potencia en un rango lineal de 0 a 100% del voltaje aplicado, posibilitando un ajuste perfecto de la temperatura deseada.

Estos dispositivos proporcionan un aumento de la vida útil de los elementos de calentamiento al funcionar en voltaje reducido constante, sin conmutaciones.

ANEXO I. PERFILES DE TEMPERATURA y pH

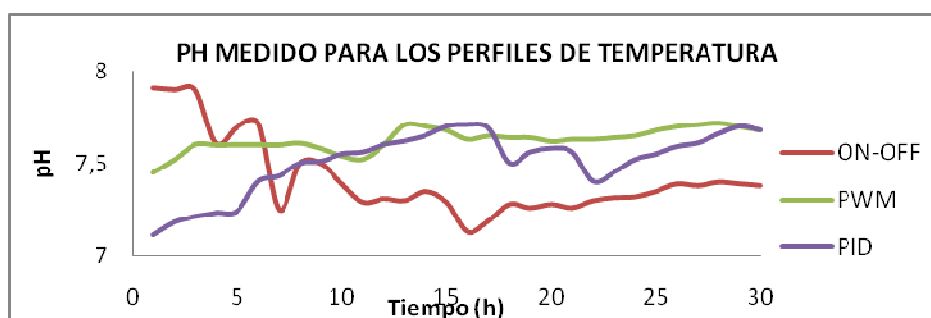
Figura I.1. Comparación del control de la temperatura con los diferentes métodos de control



FUENTE: Autor

Los siguientes perfiles de pH se dan para los respectivos controles de temperatura anteriores.

Figura I.2. Comparación del pH medido para cada control de temperatura.



FUENTE: Autor

Tabla I.1: resumen estadístico de la medición

	pH			TEMPERATURA			BIOGÁS		
	PID	PWM	ON-OFF	PID	PWM	ON-OFF	PID	PWM	ON-OFF
MEDIA	7,55	7,315	7,35	38	37,025	36,542	0,25	0,19	0,17
MODA	7,56	7,5	7,39	38,01	38	N/A	0,25	0,19	0,16
VARIANZA	0,028	0,0215	0,044	1,7E ⁻³	2,047	6,5	6,4E ⁻⁶	2,3E ⁻³	0,8E ⁻³

FUENTE: Autor

ANEXO J. REGISTRO DE PH, TEMPERATURA Y VOLUMEN DE BIOGÁS

Los registros de la producción de biogás con los diferentes métodos de control fueron:

Tabla J.1. Registro de temperatura, pH y biogás obtenido sin método de control.

REGISTRO SIN CONTROL				
Muestra	VOL GAS	T°C	pH	Δ Vol. Gas
1	553,8	33,4	7,31	0,14
2	553,94	32,8	7,2	0,15
3	554,09	32,3	6,9	0,12
4	554,21	31,2	6,61	0,1
5	554,31	29	6,7	0,08
6	554,39	28	6,72	0,07
7	554,46	27	7,15	0,07
8	554,53	25,9	7,1	0,03
9	554,56	26	7,2	0,05
10	554,61	25,98	7,29	0,06
11	554,67	27,5	7,3	0,07
12	554,74	27,573	7,31	0,07
13	554,81	27,59	7,32	0,08
14	554,89	27,75	7,305	0,09
15	554,98	26,94	7,3	0,07
16	555,05	27,9	7,33	0,08
17	555,13	28,3	7,29	0,09
18	555,22	33,1	7,25	0,1
19	555,32	25,7	7,22	0,05
20	555,37	26,47	7,29	0,07
21	555,44	26,18	7,31	0,07
22	555,51	27,03	7,33	0,08
23	555,59	29,02	7,32	0,09
24	555,68	30,2	7,3	0,09
25	555,77	31,5	7,28	0,08
26	555,85	32	7,25	0,09
27	555,94	33	7,3	0,09
28	556,03	32	7,3	0,05
29	556,08	33	7,32	0,1
30	556,18	34	7,401	0,15

FUENTE: Autor

Tabla J.2. Registro de temperatura, pH y biogás obtenido sin método de control.

REGISTRO CON CONTROL ON-OFF				
Muestra	VOL GAS	T°C	pH	Δ Vol. Gas
1	738,4	40	7,91	0,15
2	738,55	39,056	7,9	0,18
3	738,73	38,572	7,9	0,22
4	738,95	37,403	7,61	0,23
5	739,18	35,426	7,7	0,24
6	739,42	34,075	7,72	0,22
7	739,64	32,09	7,25	0,19
8	739,83	34,96	7,5	0,18
9	740,01	36,845	7,5	0,17
10	740,18	38,91	7,39	0,2
11	740,38	40,05	7,29	0,18
12	740,56	38,04	7,31	0,21
13	740,77	36,371	7,3	0,17
14	740,94	34,012	7,35	0,16
15	741,1	31,35	7,29	0,15
16	741,25	32,46	7,13	0,14
17	741,39	34,76	7,19	0,16
18	741,55	36,92	7,28	0,17
19	741,72	38,0471	7,26	0,2
20	741,92	39,97	7,28	0,18
21	742,1	37,841	7,26	0,16
22	742,26	35,16	7,3	0,16
23	742,42	34,03	7,315	0,14
24	742,56	32,11	7,32	0,13
25	742,69	33,15	7,35	0,13
26	742,82	34,205	7,39	0,15
27	742,97	35,09	7,38	0,16
28	743,13	36,713	7,4	0,17
29	743,3	37,623	7,39	0,19
30	743,49	38,4	7,38	0,2

FUENTE: Autor

Tabla J.3. Registro de temperatura, pH y biogás obtenido con el control PID con PWM

REGISTRO CON CONTROL PID CON PWM				
Muestra	VOL GAS	T°C	pH	Δ Vol. Gas
1	4996	34,5	7,45	0,19
2	4996,19	36,7	7,52	0,18
3	4996,37	37,8	7,602	0,19
4	4996,56	38	7,6	0,2
5	4996,76	38,7	7,601	0,2
6	4996,96	39,2	7,601	0,21
7	4997,17	38,6	7,6	0,23
8	4997,4	37,03	7,61	0,24
9	4997,64	36,25	7,58	0,22
10	4997,86	34,12	7,54	0,21
11	4998,07	33,79	7,523	0,2
12	4998,27	35,6	7,6	0,19
13	4998,46	36,9	7,71	0,19
14	4998,65	38	7,701	0,18
15	4998,83	38,3	7,68	0,18
16	4999,01	37,4	7,63	0,2
17	4999,21	35,3	7,65	0,18
18	4999,39	34,9	7,64	0,19
19	4999,58	36,616	7,64	0,19
20	4999,77	36,982	7,62	0,19
21	4999,96	37,021	7,63	0,18
22	5000,14	38,2242	7,63	0,18
23	5000,32	39,51	7,64	0,18
24	5000,5	37,592	7,65	0,18
25	5000,68	37,5	7,68	0,2
26	5000,88	37,3	7,7	0,18
27	5001,06	36	7,71	0,18
28	5001,24	36,5	7,72	0,19
29	5001,43	37	7,7	0,19
30	5001,62	37,1	7,68	0,19

FUENTE: Autor

Tabla J.4. Registro de temperatura, pH y biogás obtenido con el método de control PID con el variador de potencia

REGISTRO CON CONTROL PID CON EL VARIADOR DE POTENCIA				
Muestra	VOL GAS	T°C	pH	Δ Vol. Gas
1	738,4	38	7,91	0,24
2	738,64	38,03	7,9	0,24
3	738,64	38,01	7,9	0,25
4	738,65	37,994	7,61	0,25
5	738,65	37,995	7,7	0,25
6	738,65	38,01	7,72	0,25
7	738,65	38,01	7,25	0,25
8	738,65	37,993	7,5	0,25
9	738,65	37,995	7,5	0,25
10	738,65	38,015	7,39	0,25
11	738,65	38	7,29	0,25
12	738,65	37,996	7,31	0,25
13	738,65	37,999	7,3	0,25
14	738,65	38,01	7,35	0,25
15	738,65	38,01	7,29	0,25
16	738,65	37,995	7,13	0,25
17	738,65	37,999	7,19	0,25
18	738,65	38,015	7,28	0,25
19	738,65	38,01	7,26	0,25
20	738,65	38	7,28	0,25
21	738,65	38	7,26	0,25
22	738,65	37,995	7,3	0,25
23	738,65	38,01	7,315	0,25
24	738,65	38,05	7,32	0,25
25	738,65	38,03	7,35	0,25
26	738,65	38,01	7,39	0,25
27	738,65	37,99	7,38	0,25
28	738,65	37,99	7,4	0,25
29	738,65	38,01	7,39	0,25
30	738,65	38	7,38	0,25

FUENTE: Autor